

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Řízení asynchronních motorů v nestandardních provozních
režimech

Control of Asynchronous Motors by Non-Standard
Operation Modes

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Sobota**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Řízení asynchronních motorů v nestandardních provozních režimech**
Control of Asynchronous Motors by Non-Standard Operation Modes

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor práce asynchronního elektromotoru navrženého pro napětí 500V na síti 400V
2. Měření asynchronního elektromotoru při napájení 500V a 400V při různých provozních režimech
3. Vyhodnocení měření
4. Porovnání teoretických výpočtů s naměřenými hodnotami
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Bašta, J., Kulda, V., Pavlásek, F. a kol.: Měření na indukčních strojích, Praha, SNTL 1962
2. Chmelík, K.: Asynchronní a synchronní elektrické stroje, skriptu VŠB-TU Ostrava, 2002
3. Michálec, J., Peřina, J.: Elektrické stroje I, skriptu ČVUT Praha, 1989
4. Bašta, J.: Teorie elektrických strojů, SNTL Praha 1968
5. Petrov, G., N. : Elektrické stroje 2, SNTL Praha 1982


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011
Datum odevzdání: 04.05.2012




prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

„Čestně prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“



.....

V Ostravě

dne: 4.května 2012

Poděkování:

Na tomto místě bych rád věnoval poděkování vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Václavu Čechovi, Ph.D. za rady a připomínky, které mi poskytoval během tvorby mé diplomové práce.

Abstrakt:

Tato diplomová práce rozebírá vlastnosti a chování asynchronního motoru v nestandardních provozních režimech. Práce obsahuje teoretický rozbor nestandardních provozních režimů, a to především se zaměřením na praktickou část této práce. Na vybraném asynchronním elektromotoru bylo provedeno měření, které bylo konfrontováno s výsledky získanými simulacemi vybraných nestandardních provozních režimů.

Klíčová slova:

Asynchronní motor, nestandardní provozní režim, softstartér, frekvenční měnič

Abstract:

This thesis examines the properties and behavior of induction motor in non-standard operating modes. The work includes theoretical analysis of non-standard operating modes, especially with the focus on the practical part of this work. The measurements were taken on selected induction motor and then compared with the results gained from simulations of non-standard operation modes.

Key words:

Induction motor, non-standard operation modes, softstarter, drive

Seznam některých použitých symbolů a značek

symbol	název	jednotka
$\cos\varphi_{0N}$	Účinník naprázdno	(-)
$\cos\varphi_k$	Účinník pro odečtený moment M_{k1}	(-)
ΔP_{10N}	Příkon naprázdno	(W)
ϕ	Magnetický tok	(Wb)
f_1	Frekvence	(Hz)
η	Účinnost	(%)
I_{1n}	Záběžný proud při jmenovitém napětí	(A)
I_{1s}	Záběžný proud při sníženém napětí	(A)
I_{1s}	Efektivní hodnota špičkového proudu	(A)
$I_{1s\dot{s}}$	Efektivní hodnota špičkového proudu po skončení kick startu	(A)
I_{1u}	Efektivní hodnota ustáleného proudu	(A)
I_{fe}	Ztrátový proud v železe	(A)
I_{KN}	Proud nakrátko při jmenovitém napětí	(A)
I_μ	Magnetizační proud	(A)
I_p	Proud ve fázi	(A)
L_μ	Vzájemná indukčnost	(H)
L_σ	Celková indukčnost motoru	(H)
M_l	Moment počítán z proudu	(Nm)
M_k	Hodnota původního momentu	(Nm)
M_{k1}	Moment z měření nakrátko	(Nm)
M_{ks}	Hodnota sníženého momentu	(Nm)
M_{mer}	Hodnota změřeného momentu	(Nm)
M_n	Jmenovitý moment motoru	(Nm)
M_U	Moment počítán z napětí	(Nm)
M_{ztr}	Ztrátový moment	(Nm)
n_s	Synchronní otáčky	(min-1)
P_n	Jmenovitý výkon motoru	(W)
R_{Fe}	Ztráty v železe	(Ω)
R_K	Činný odpor stroje	(Ω)
R_s	Odpor statorového vinutí	(Ω)
s	Skluz	(%)
S_M	Zdánlivý výkon motoru	(VA)
T_e	Moment zvratu elektromagnetického statorového pole	(Nm)
t_e	Čas při dosažení T_e	(s)
t_r	Doba rozběhu motoru	(s)
U_1	Fázové napětí	(V)
U_{1n}	Jmenovité napětí	(V)
U_{1s}	Snížené napětí při spouštění	(V)
U_{k1}	Napětí pro odečtený moment M_{k1}	(V)
U_p	Napětí fáze	(V)
ω_n	Jmenovitá úhlová rychlost	(-)
X_μ	Magnetizační reaktance	(Ω)
X_σ	Rozptylová reaktance	(Ω)

Obsah

Úvod.....	7
1 Asynchronní motor připojen přímo do sítě.....	10
1.1 Obecný rozbor přímého spouštění asynchronního motoru na napájecí síť.....	10
1.2 Zatížený asynchronní motor při jmenovitém napětí 500 V, vinutí do D.....	11
1.3 Zatížený asynchronní motor při jmenovitém napětí 500 V, vinutí do YY.....	13
1.4 Řízení asynchronního motoru při sníženém napětí 400 V.....	15
1.5 Zatížený asynchronní motor při sníženém napětí 400 V, vinutí do D.....	16
1.6 Zatížený asynchronní motor při sníženém napětí 400 V, vinutí do YY.....	18
1.7 Porovnání momentu pro napájecí napětí 500 V a 400 V.....	20
1.8 Rozbor rozběhu asynchronního motoru naprázdno, zapojení D.....	22
1.9 Rozbor a simulace rozběhu asynchronního motoru naprázdno, zapojení YY.....	24
2 Rozběh asynchronního motoru softstartérem.....	30
2.1 Lineární rampa rozběhu 3 s (nezatížený, zapojení D, šířka pulzu 1 s, 400 V)	33
2.2 Lineární rampa rozběhu 5 s (nezatížený, zapojení D, šířka pulzu 1 s, 400 V)	34
2.3 Lineární rampa rozběhu 10 s (nezatížený, zapojení D, šířka pulzu 1 s, 400 V) ..	35
2.4 Lineární rampa rozběhu 3 s (nezatížený, zapojení D, šířka pulzu 0,5 s, 400 V) .	36
2.5 Lineární rampa rozběhu 5 s (nezatížený, zapojení D, šířka pulzu 0,5 s, 400 V) .	37
2.6 Lineární rampa rozběhu 10 s (nezatížený, zapojení D, šířka pulzu 0,5 s, 400 V)	38
3 Rozběh asynchronního motoru pomocí frekvenčního měniče.....	40
3.1 Zapojení asynchronního motoru do trojúhelníka.....	43
3.1.1 Frekvence 10 Hz napětí 76 V, f-měnič spuštěn.....	43
3.1.2 Frekvence 25 Hz napětí 190 V, f-měnič spuštěn.....	44
3.1.3 Frekvence 50 Hz napětí 380 V, f-měnič spuštěn.....	45
3.1.4 Frekvence 60 Hz napětí 380 V, f-měnič spuštěn.....	46
3.1.5 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,2 s.....	47
3.1.6 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,3 s.....	48
3.1.7 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,4 s.....	49
3.1.8 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,8 s.....	50
3.2 Zapojení asynchronního motoru do dvojité hvězdy.....	51
3.2.1 Frekvence 10 Hz napětí 76 V, f-měnič spuštěn, simulace.....	51
3.2.2 Frekvence 25 Hz napětí 190 V, f-měnič spuštěn, simulace.....	54
3.2.3 Frekvence 50 Hz napětí 380 V, f-měnič spuštěn, simulace.....	57
3.2.4 Frekvence 60 Hz napětí 380 V, f-měnič spuštěn, simulace.....	60
3.2.5 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,2 s.....	63
3.2.6 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,3 s.....	64
3.2.7 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,4 s.....	65
3.2.8 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,8 s.....	66
3.3 Porovnání rozběhu s frekvenčním měničem a s rozběhem motoru při napájení ze sítě, zapojení vinutí D.....	67
3.4 Porovnání rozběhu s frekvenčním měničem a s rozběhem motoru při napájení ze sítě, zapojení vinutí YY.....	70
4 Porovnání teoretických a naměřených hodnot.....	74
4.1 Popis simulace.....	74
4.2 Asynchronní motor, měření naprázdno, vinutí do YY.....	75
4.3 Asynchronní motor, měření nakrátko, vinutí do YY.....	76
4.4 Parametry pro simulaci asynchronního motoru, vinutí YY.....	77
5 Závěr.....	80

Úvod

Asynchronní stroj je v dnešní době nejrozšířenější točivý stroj. K tomuto prvenství mu dopomohla jeho jednoduchost, spolehlivost, provozní vlastnosti a pořizovací cena. V průmyslovém odvětví se asynchronních strojů používá pro pohon nejrůznějších zařízení v rozličných provozních podmínkách, což je spojeno s nároky na jeho univerzálnost. Z dnešním rozvojem frekvenčních měničů již odpadá problém regulace jeho rychlosti, avšak stále je zde problém s nároky na jeho spouštění. V dnešní době se již k omezení záběrného proudu nepoužívá jen snížení napětí prostřednictvím autotransformátoru popřípadě přepínače Y/D, ale také softstartéru. Veškerý provoz spojený s frekvenčními měniči a softstartéry lze považovat oblasti řízení motorů v nestandardních provozních režimech.

Právě problematikou řízení motorů v nestandardních provozních režimech se zabývá má diplomová práce, kterou jsem koncipoval do 4 kapitol. První kapitola je věnována napájení motoru při klasickém snížení napětí autotransformátorem. Druhou kapitolu jsem věnoval spouštění asynchronního motoru při sníženém napětí přes softstartér. V třetí kapitole posuzuji vlastnosti motoru, při řízení frekvenčním měničem. V závěrečné kapitole jsem posuzoval naměřená data s teoretickými předpoklady získanými simulacemi vybraných nestandardních provozních režimů.

Měření bylo realizováno na asynchronním elektromotoru AP112M – 42, MEZ Mohelnice.
v.č. 2816738, VŠB 174/510

Zapojení: D/YY

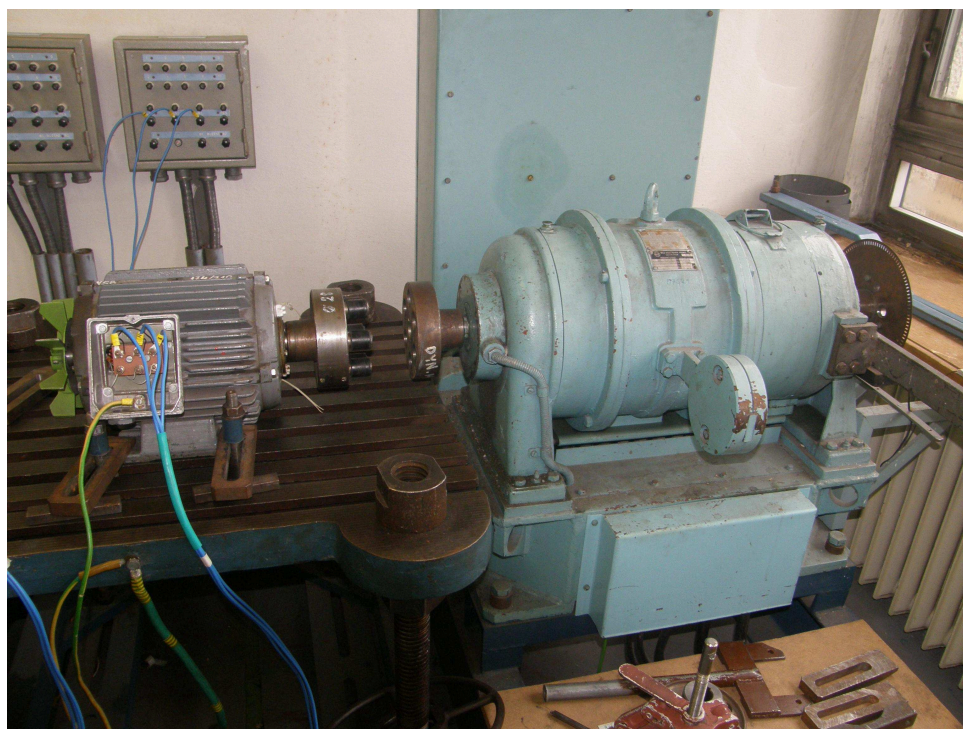
Jmenovitý výkon: 3/4 kW

Jmenovitý proud: 4,8/6 A

Otáčky: 1440/2890 min⁻¹

Napětí: 500 V

Hmotnost: 52 kg



Obr. 1 Foto rozpojeného soustrojí motor – dynamometr

Použité přístroje:

Měřicí souprava propojena s PC

MTP: TL20; 0,05 %; (v.č. 780/1421, v.č. 305/1370, v.č. 305/1371)

Osciloskop: Fluke scopemeter color 199C, 200MHz, 2GS/s

Sonda: Kyoritsu clamp adapter 8112, 200 mV/20A 2kΩ

Dynamometr: typ KS 26-4, v.č. 235205

Provedení Bb 1

Výkon: 0,33/5/10 kW

Otáčky: 100/1500/3000 min⁻¹

Proud: 55/60/65 A

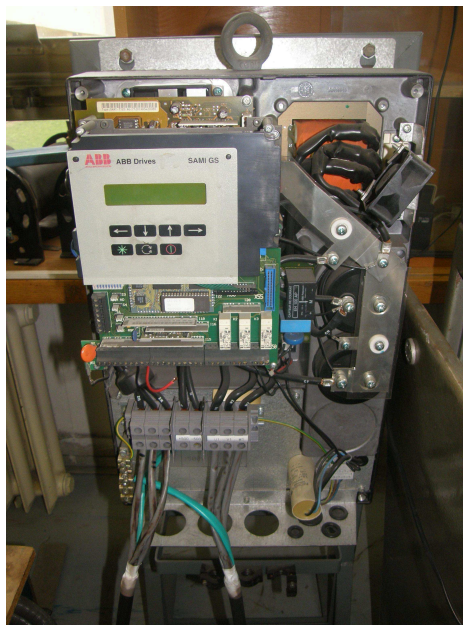
Hmotnost: 530 kg

Softstartér: Solcon – RVS-DX



Obr. 2 Katalogový snímek použitého softstartéru

Frekvenční měnič: ABB – SAMI GS



Obr. 3 Snímek použitého frekvenčního měniče

1 Asynchronní motor připojen přímo do sítě

Pro přímé připojení motoru na elektrickou síť a jeho následné spuštění musíme splňovat požadavky, že ráz nebude přesahovat hodnotu 22 kVA, což splňují motory se jmenovitým výkonem do 3 kW včetně. V případě zvláště dobré přenosové sítě lze připojit motor i většího výkonu, avšak úbytek způsobený krajním spouštěcím proudem, nesmí přesahovat stanovené hodnoty, a to 10 % ve dne, 5 % ve špičkách a 15 % v noci.

V případě přímého spouštění motoru v rámci průmyslového podniku je velikost výkonu omezena konkrétní konfigurací podnikové elektrifikační sítě. Při dodržení zvláštního opatření, jako je vyčlenění zvláštního přívodu z elektrárny apod., se spouštějí i motory o výkonu jednotek megawatt ($2 \div 4 \text{ MW}$). [1]

1.1 *Obecný rozbor přímého spouštění asynchronního motoru na napájecí síť*

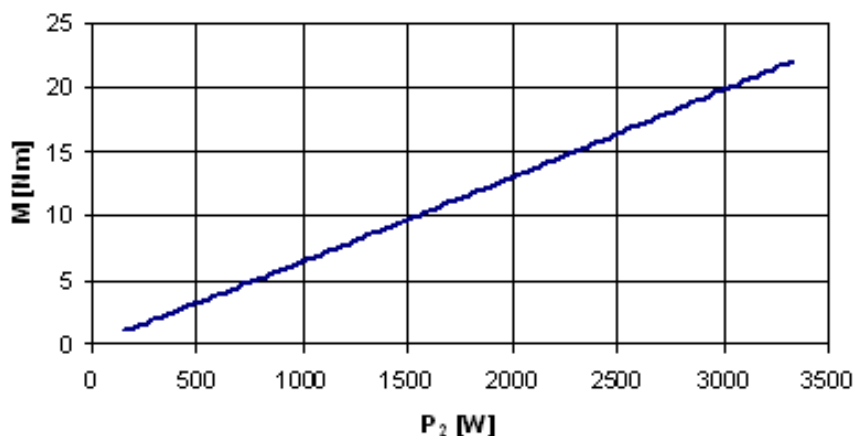
Spouštění asynchronního motoru je přechodový děj, při kterém motor přechází z klidového stavu na pracovní otáčky. Plynulost a rychlost tohoto přechodného děje, během něhož se mění nejen rychlost motoru, ale i proudy a momenty, může mít značný vliv jak na vlastní motor, tak i na poháněné zařízení. [1] Obzvláště v případě jeřábových motorů, kdy počet spuštění za hodinu se blíží až 900.

Záběrný proud je v okamžiku připojení motoru k síti omezen při jmenovitém napětí, pouze impedancí motoru nakrátko. Může tedy dosahovat velkých hodnot a obvykle se jeho hodnota pohybuje v rozmezí 3 až 7,5 násobku jmenovitého proudu, přičemž horní mez tohoto násobku se nesmí překročit.

1.2 Zatížený asynchronní motor při jmenovitém napětí 500 V, vinutí do D

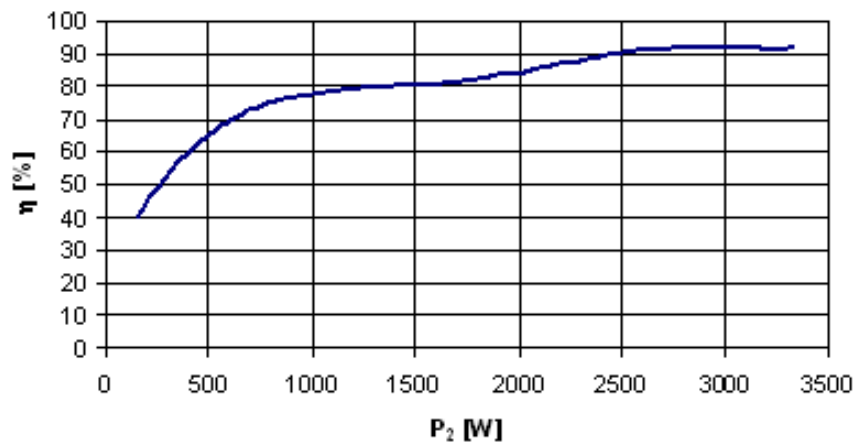
Měření momentu probíhalo pro napájecí napětí 500 V, kdy vinutí motoru bylo zapojeno do trojúhelníku. Byl tedy v zapojení pro nižší otáčky. Z grafu (obr. 1.1) je možné určit jmenovitý moment asynchronního motoru, jehož hodnota je 20 Nm. Hodnotu můžeme ověřit následujícím výpočtem:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{3000}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 1440}{60}} = 19,9 \text{ Nm} \quad (1.1)$$



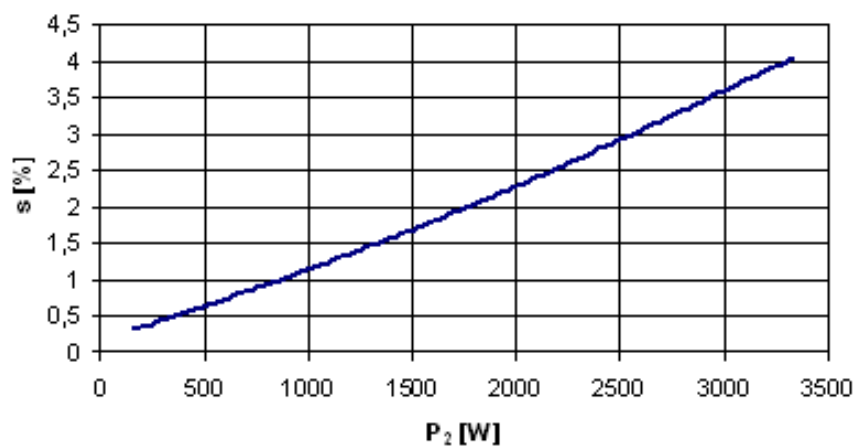
Obr. 1.1 Momentová charakteristika asynchronního elektromotoru napájeného ze sítě jmenovitým napětím 500 V, průběh momentu v závislosti na výkonu

V grafu (obr. 1.2) je vynesena účinnost v závislosti na výkonu asynchronního motoru. V případě napájení 500 V a zapojení vinutí do trojúhelníku je možné při jmenovitém výkonu určit hodnotu účinnosti 92 %.



Obr. 1.2 Průběh účinnosti v závislosti na výkonu

V grafu (obr. 1.3) je vynesena závislost skluzu na výkonu. Pro jmenovitý výkon lze odečíst velikost skluzu 3,6 %.

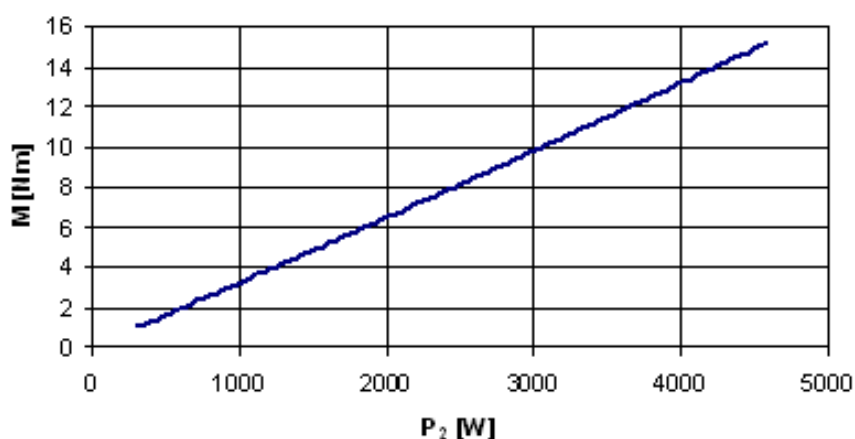


Obr. 1.3 Závislost skluzu na výkonu

1.3 Zatížený asynchronní motor při jmenovitém napětí 500 V, vinutí do YY

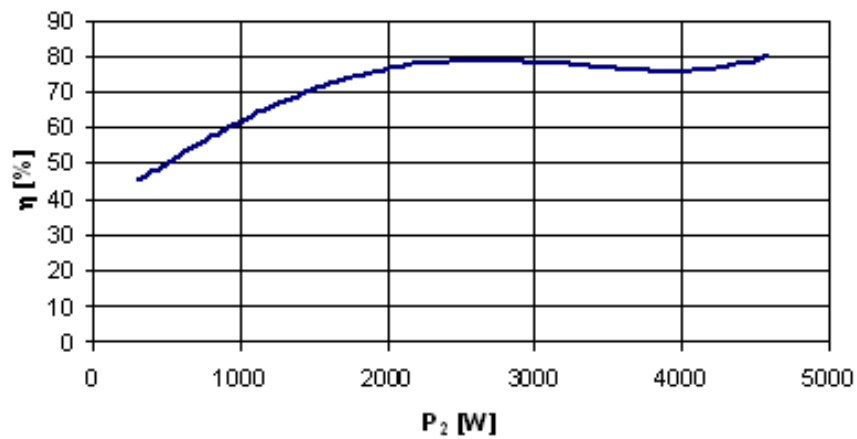
Měření momentu probíhalo pro napájecí napětí 500 V, kdy vinutí motoru bylo zapojeno do YY. Byl tedy v zapojení pro vyšší otáčky. Z grafu (obr. 1.4) je možné určit jmenovitý moment asynchronního motoru, jehož hodnota je 13,3 Nm. Hodnotu můžeme ověřit následujícím výpočtem:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{4000}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 2890}{60}} = 13,2 \text{ Nm} \quad (1.2)$$



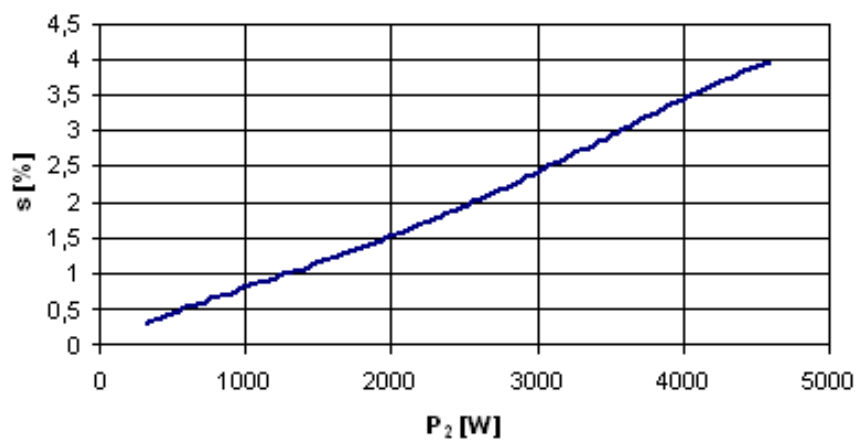
Obr. 1.4 Momentová charakteristika asynchronního elektromotoru napájeného ze sítě jmenovitým napětím 500 V, průběh momentu v závislosti na výkonu

V grafu (obr. 1.5) je vynesena účinnost v závislosti na výkonu asynchronního motoru. V případě napájení 500 V a zapojení vinutí do dvojité hvězdy je možné při jmenovitém výkonu určit hodnotu účinnosti 76 %.



Obr. 1.5 Průběh účinnosti v závislosti na výkonu

V grafu (obr. 1.6) je vynesena závislost skluzu na výkonu. Pro jmenovitý výkon lze odečíst velikost skluzu 3,4 %.



Obr. 1.6 Závislost skluzu na výkonu

1.4 Řízení asynchronního motoru při sníženém napětí 400 V

Asynchronní motor se v dnešní době už jen zřídka řídí sníženým napětím. Změna napájecího napětí má zanedbatelně malý vliv na otáčivou rychlost. V případě, že od asynchronního motoru nepožadujeme plný záběrný moment, lze provést rozběh asynchronního motoru za pomoci sníženého napájecího napětí. Moment motoru je závislý s kvadrátem napětí, zjednodušeně lze tedy napsat:

$$M_{ks} = M_k \cdot \left(\frac{U_{1s}}{U_{1n}} \right)^2 = M_k \left(\frac{I_{1s}}{I_{1n}} \right)^2 \quad (Nm) \quad (1.3)$$

U_{1s} snížené napětí při spouštění

U_{1n} jmenovité napětí

I_{1s} záběrný proud při sníženém napětí

I_{1n} záběrný proud při jmenovitém napětí

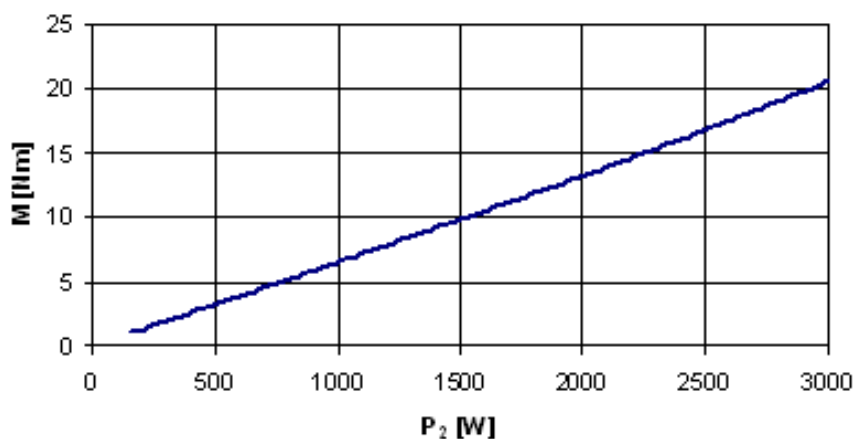
Sníženého napětí na motoru je možno docílit:

- předřazením rezistoru nebo tlumivky statorovému vinutí
- spouštěcím autotransformátorem
- přepojením statorového vinutí nejdříve do hvězdy a pak do trojúhelníku

V mém případě pro snížení napájecího napětí bylo využito autotransformátoru. Motor je navržen na jmenovitou hodnotu napájecího napětí 500 V. Napětí jsem snížil na běžné napětí sítě, tedy 400 V.

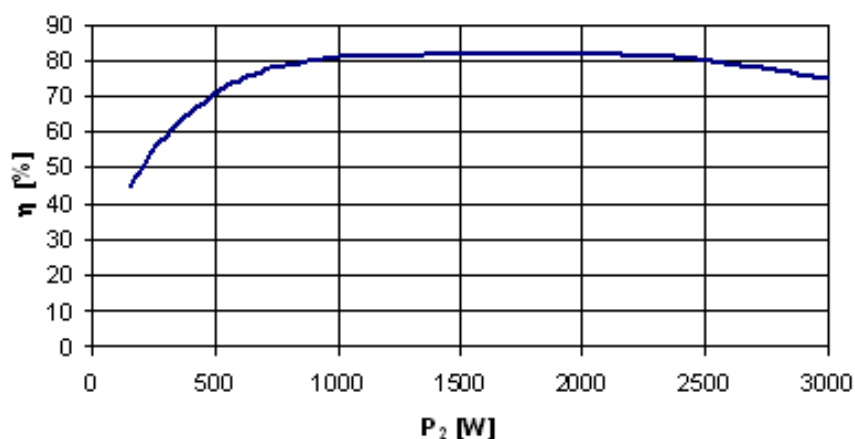
1.5 Zatížený asynchronní motor při sníženém napětí 400 V, vinutí do D

Měření momentu probíhalo pro snížené napájecí napětí 400 V, kdy vinutí motoru bylo zapojeno do trojúhelníku. Motor byl tedy v zapojení pro nižší otáčky. Z grafu (obr. 1.7) je možné určit moment asynchronního motoru 20,5 Nm, při výkonu 3000 W.



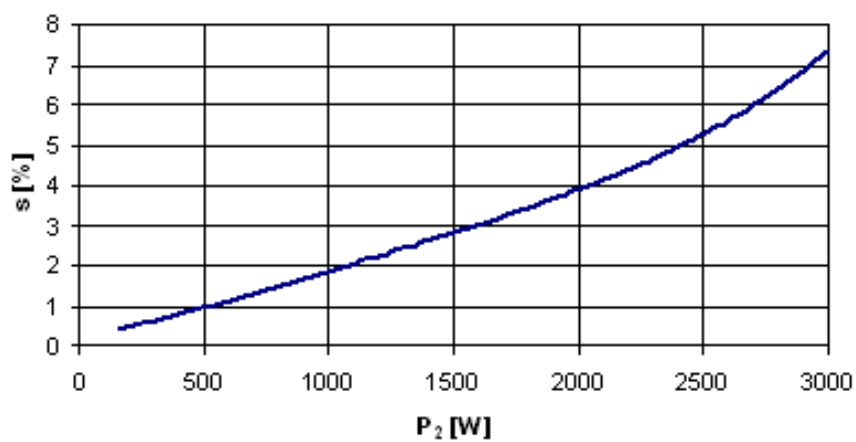
Obr. 1.7 Momentová charakteristika asynchronního elektromotoru napájeného ze sítě jmenovitým napětím 400 V, průběh momentu v závislosti na výkonu

V grafu (obr. 1.8) je vynesena účinnost v závislosti na výkonu. V případě napájení 400 V a zapojení vinutí do trojúhelníku, je možné určit hodnotu účinnosti 75 %, při výkonu 3000 W.



Obr. 1.8 Průběh účinnosti v závislosti na výkonu

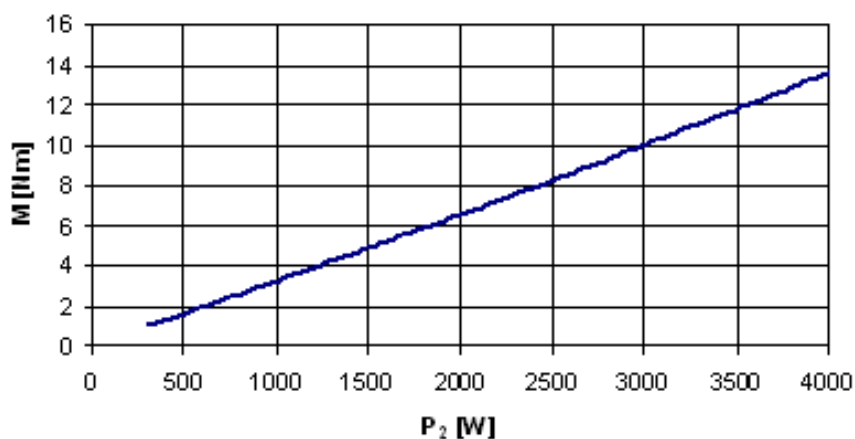
V grafu (obr. 1.9) je vynesena závislost skluzu na výkonu. Pro výkon 3000 W lze odečíst velikost skluzu 7,4 %.



Obr. 1.9 Závislost skluzu na výkonu

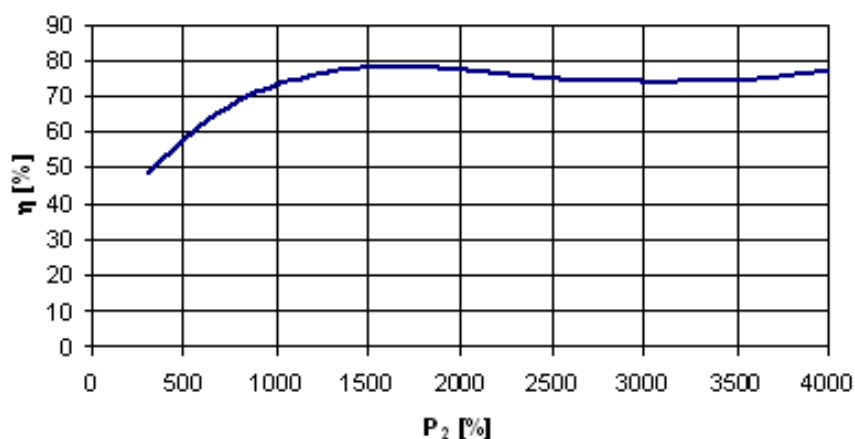
1.6 Zatížený asynchronní motor při sníženém napětí 400 V, vinutí do YY

Měření momentu probíhalo pro snížené napájecí napětí 400 V, kdy vinutí motoru bylo zapojeno do dvojité hvězdy. Byl tedy v zapojení pro vyšší otáčky. Z grafu (obr. 1.10) je možné určit moment asynchronního motoru 13,8 Nm, při výkonu 4000 W.



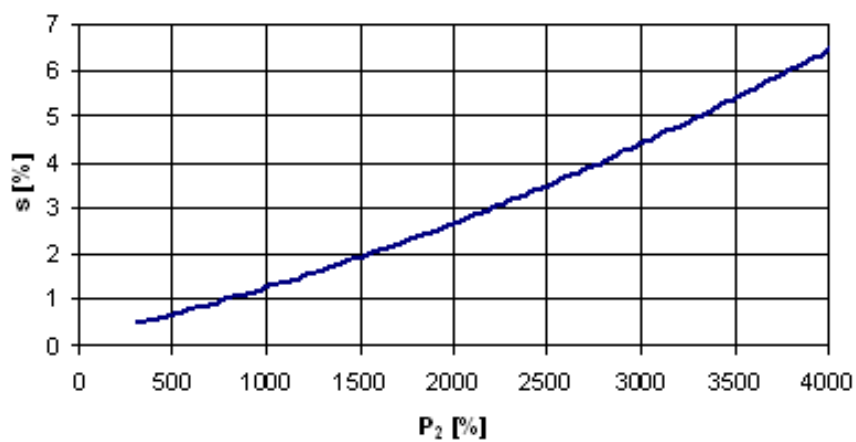
Obr. 1.10 Momentová charakteristika asynchronního elektromotoru napájeného ze sítě jmenovitým napětím 400 V, průběh momentu v závislosti na výkonu

V grafu (obr. 1.11) je vynesena účinnost v závislosti na výkonu. V případě napájení 400 V a zapojení vinutí do dvojité hvězdy, je možné určit hodnotu účinnosti 78 %, při výkonu 4000 W.



Obr. 1.11 Zatěžovací charakteristika: průběh účinnosti při napětí 400 V

V grafu (obr. 1.12) je vynesena závislost skluzu na výkonu. Pro výkon 3000 W lze odečíst velikost skluzu 6,5 %.

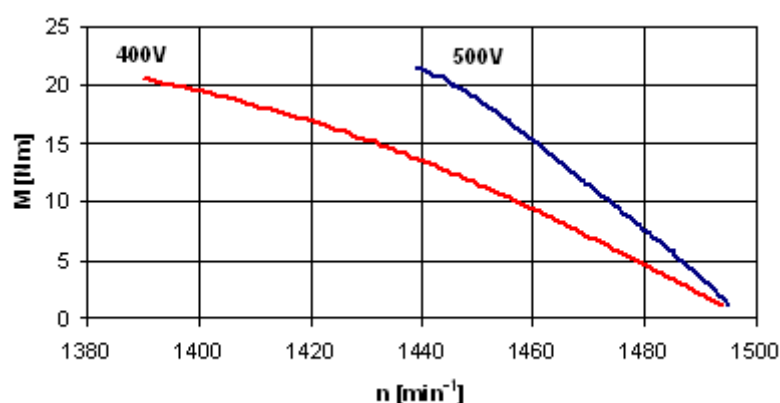


Obr. 1.12 Závislost skluzu na výkonu

1.7 Porovnání momentu pro napájecí napětí 500 V a 400 V

Z měření, která jsem provedl, jsem vynesl grafy, a to závislost momentu na otáčkách. Na charakteristice (obr. 1.13, obr. 1.14) lze pozorovat, že moment klesá s kvadrátem napětí.

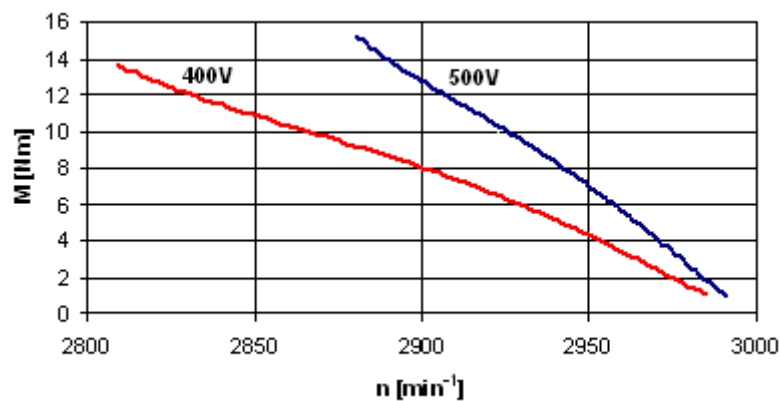
Pro jmenovité otáčky v zapojení D, je vytvořena tabulka naměřených hodnot 1.1. Tyto hodnoty jsou použity ve výpočtech. 1.4 a 1.5. Pro zapojení vinutí do YY je rovněž vytvořena tabulka naměřených hodnot 1.2 a hodnoty jsou použity ve výpočtech 1.6 a 1.7.



Obr. 1.13 Porovnání naměřených momentů pro napětí 400 V a 500 V v závislosti na otáčkách.
Zapojení vinutí do D

Tab. 1.1 Naměřené hodnoty pro zapojení vinutí do D, pro otáčky 1440 min⁻¹.

U_s [V]	M_{mer} [Nm]	U_p [V]	I_p [A]
400V	13,4	230,1	3,9
500V	20,6	290,6	4,73



Obr. 1.14 Porovnání naměřených momentů pro napětí 400 V a 500 V v závislosti na otáčkách.
Zapojení vinutí do YY

Tab. 1.2 Naměřené hodnoty pro zapojení vinutí do YY, pro otáčky 2900 min⁻¹.

U_s [V]	M_{mer} [Nm]	U_p [V]	I_p [A]
400V	7,8	230	3,9
500V	12	290	4,73

Do výpočtu (1.3) dosadíme a provedeme porovnání s naměřenou hodnotou

Zapojení D:

Záběrný moment pro změřená napětí a proudy uvedené v tabulce 1.1.

$$M_{ks} = M_k \left(\frac{U_{1s}}{U_{1n}} \right)^2 = 20,6 \cdot \left(\frac{230,1}{290,6} \right)^2 = 12,91 Nm \quad (1.4)$$

$$M_{ks} = M_k \cdot \left(\frac{I_{1s}}{I_{1n}} \right)^2 = 20,6 \cdot \left(\frac{3,9}{4,73} \right)^2 = 14 Nm \quad (1.5)$$

Zapojení YY:

Záběrný moment pro změřená napětí a proudy uvedené v tabulce 1.2.

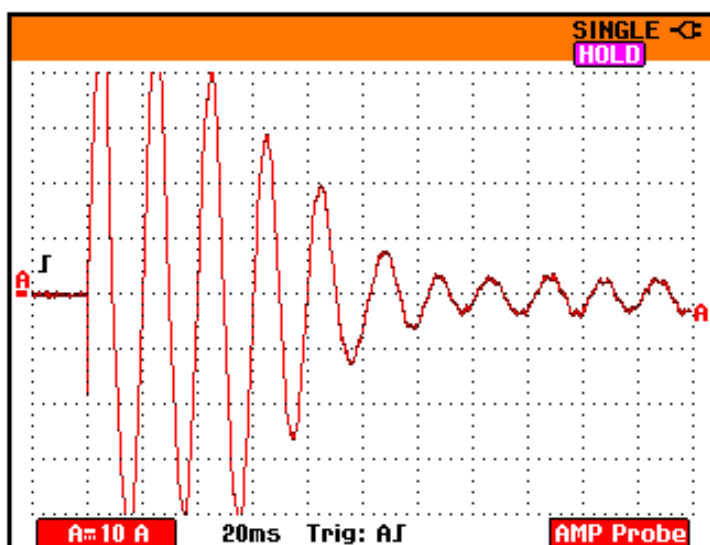
$$M_{ks} = M_k \left(\frac{U_{1s}}{U_{1n}} \right)^2 = 12 \cdot \left(\frac{231,9}{288} \right)^2 = 7,78 Nm \quad (1.6)$$

$$M_{ks} = M_k \cdot \left(\frac{I_{1s}}{I_{1n}} \right)^2 = 12 \cdot \left(\frac{4,71}{6} \right)^2 = 7,4 Nm \quad (1.7)$$

Vypočtené hodnoty pro zapojení motoru do D i YY se téměř shodují s hodnotami naměřenými.

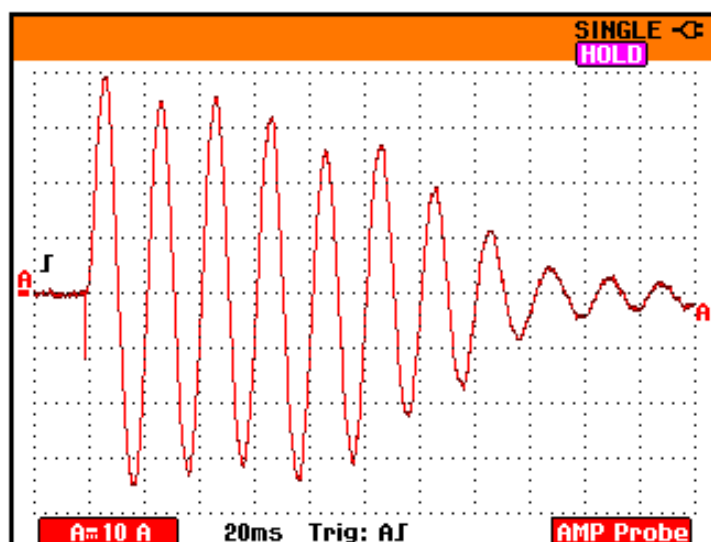
1.8 Rozbor rozběhu asynchronního motoru naprázdno, zapojení D

V záznamu z osciloskopu (obr. 1.15), kdy je motor napájen jmenovitým napětím 500 V, můžeme určit efektivní hodnotu proudové špičky jedné fáze $I_{Is}=31,8$ A, což odpovídá 6,5 násobku jmenovitého proudu. Čas rozběhu motoru je $t_r=120$ ms. Ustálený efektivní proud $I_{Iu}=2,1$ A. Je nasnadě si uvědomit, že motor je nezatížen a rozbíhá se tedy naprázdno. V případě zatížení by doba rozběhu vzrostla.



Obr. 1.15 Záznam osciloskopu při rozběhu motoru v síti 500 V v zapojení D

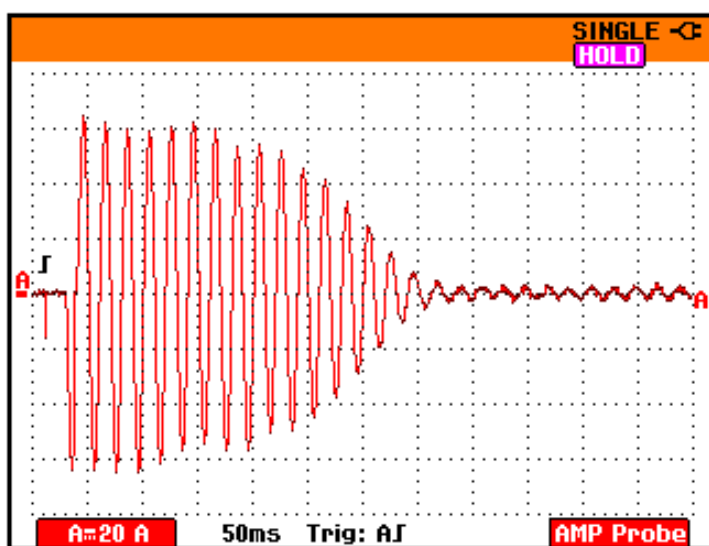
Záznam z osciloskopu (obr. 1.16), odpovídá pro napájení motoru sníženým napětím 400 V. Na první pohled je znatelný pokles proudového rázu ve fázi, tedy efektivní hodnota proudové špičky $I_{Is}=28,3$ A, což odpovídá 6 násobku záběrného proudu, ale zároveň došlo k prodloužení času rozběhu motoru $t_r=200$ ms. Ustálený proud dosáhl efektivní hodnoty $I_{Iu}=1,4$ A.



Obr. 1.16 Záznam osciloskopu při rozběhu motoru v síti 400 V v zapojení D

1.9 Rozbor a simulace rozběhu asynchronního motoru naprázdno, zapojení YY

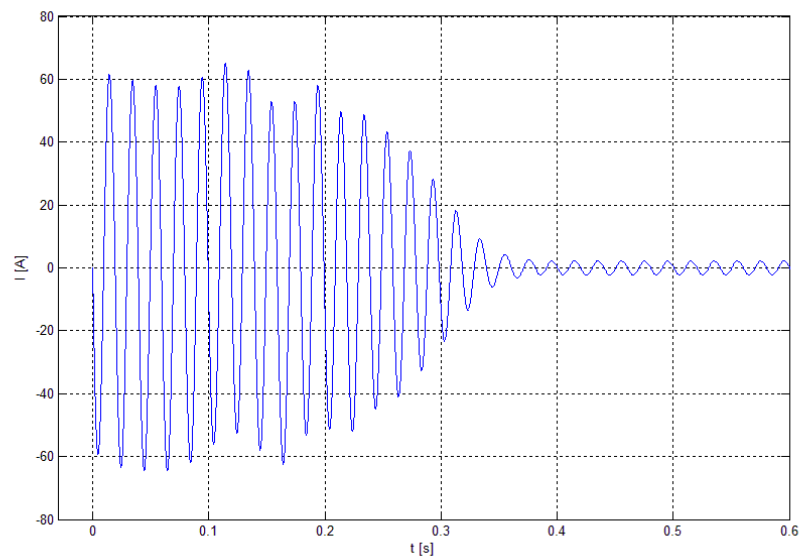
Při zapojení vinutí asynchronního motoru do dvojité hvězdy s napájením jmenovitým napětím jsme pořídili záznam osciloskopu (obr. 1.17). Z pořízeného záznamu můžeme určit efektivní hodnotu proudové špičky $I_{Is}=44,5$ A, což odpovídá 7,5 násobku jmenovitého proudu. Přibližná efektivní hodnota ustáleného proudu v první fázi je $I_{Iu}=1,4$ A. Doba rozběhu asynchronního motoru je $t_r=350$ ms.



Obr. 1.17 Záznam osciloskopu při spouštění motoru v síti 500 V v zapojení dvojité hvězda

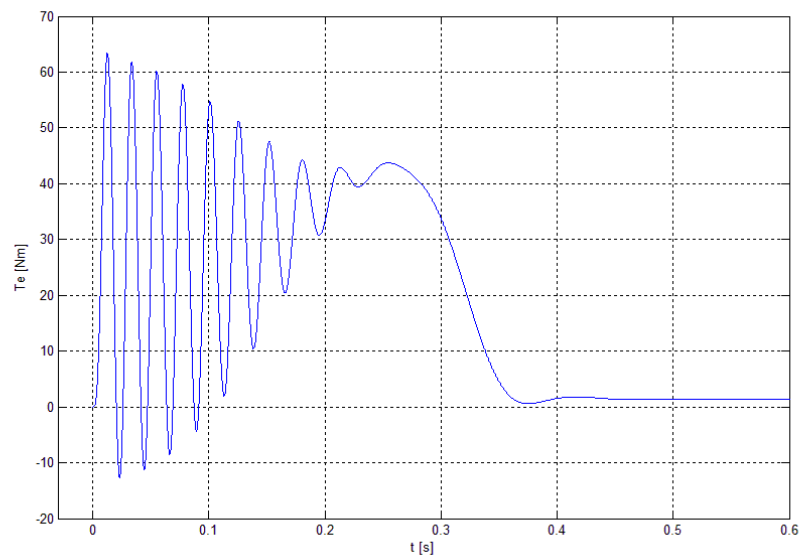
Pro posouzení průběhů některých veličin, které nebylo možné odměřit, jsem provedl simulaci v modelu kolegy Rusnoka pro asynchronní motor, kde jsem nasimuloval průběh rozběhu při jmenovitém napájení a zapojení vinutí do YY. Simulace byla uskutečněna v programu Matlab. Parametry náhradního schématu stroje, jejichž znalost je pro nastavení simulačního modelu nutná, jsou vypočítány v rámci kapitoly 4.

Simulace proudu v první fázi (obr. 1.18) se na první pohled neliší od skutečně naměřené hodnoty proudu (obr. 1.17). Lze konstatovat, že model funguje správně. V simulaci dosahuje efektivní hodnota záběrného proudu ve fázi hodnoty $I_{Is}=45,2$ A, ustálený efektivní proud hodnoty $I_{Iu}=2,5$ A. Čas rozběhu motoru do svých pracovních otáček je $t_r=360$ ms.



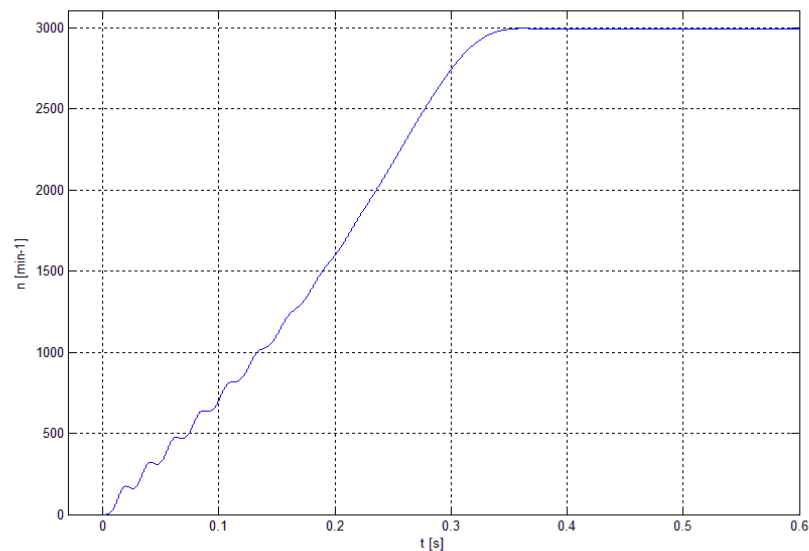
Obr. 1.18 Simulace proudu ve statoru při spouštění motoru v zapojení dvojitá hvězda při napájecím napětí 500 V

V obr. 1.19 je znázorněn průběh vnitřního elektromagnetického statorového momentu ve vzduchové mezeře, kdy z grafu lze odečíst hodnotu momentu zvratu $T_e=44$ Nm, ke kterému dochází v čase 0,25 s.



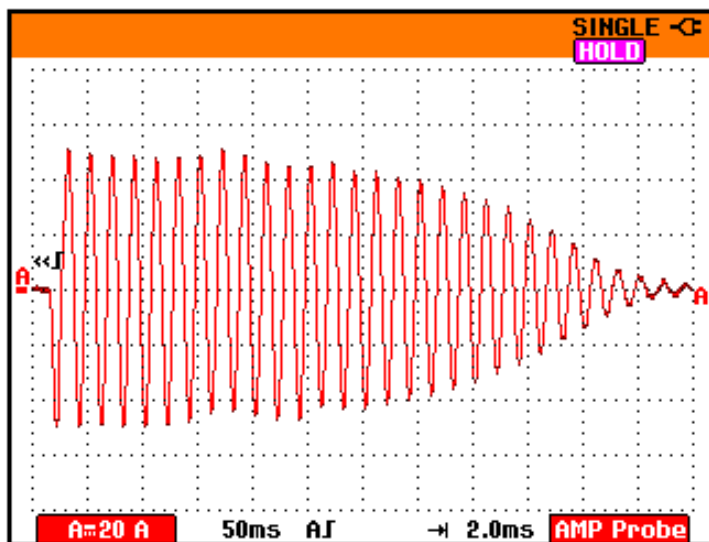
Obr. 1.19 Simulace elektromagnetického statorového momentu při napájení 500 V, zapojení vinutí YY

Průběh otáček v závislosti na čase je zobrazen na obr. 1.20, kdy se motor rozběhne za 0,35 s, poté si téměř bez záskmitu zachovává své otáčky naprázdno.



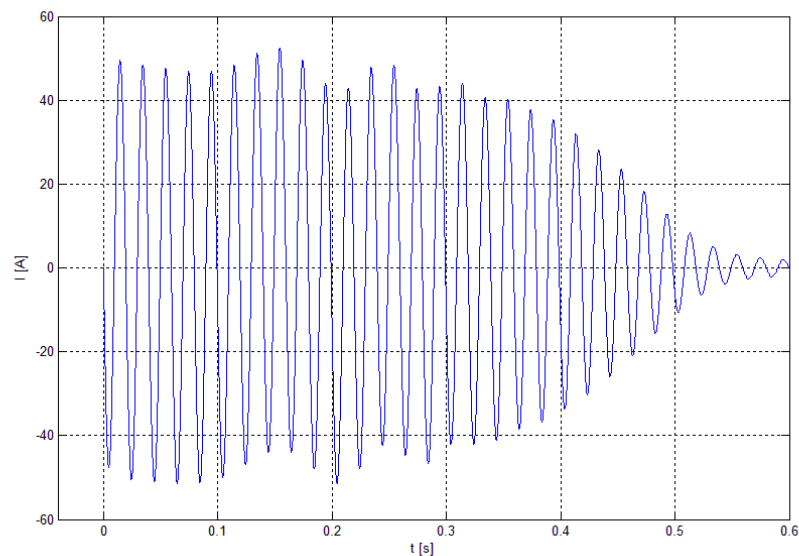
Obr. 1.20 Simulace průběhu otáček rotoru AM při zapojení vinutí do YY při jmenovitém napájení 500 V

Záznam (obr. 1.21) průběhu proudu při rozběhu asynchronního motoru při sníženém napájecím napětí 400 V. Ze záznamu odečteme efektivní hodnotu špičkového proudu $I_{I\delta}=36,8$ A. Efektivní hodnota ustáleného proudu $I_{Iu}=1,4$ A. Čas rozběhu motoru se oproti napájení jmenovitým napětím prodloužil na $t_r=575$ ms.



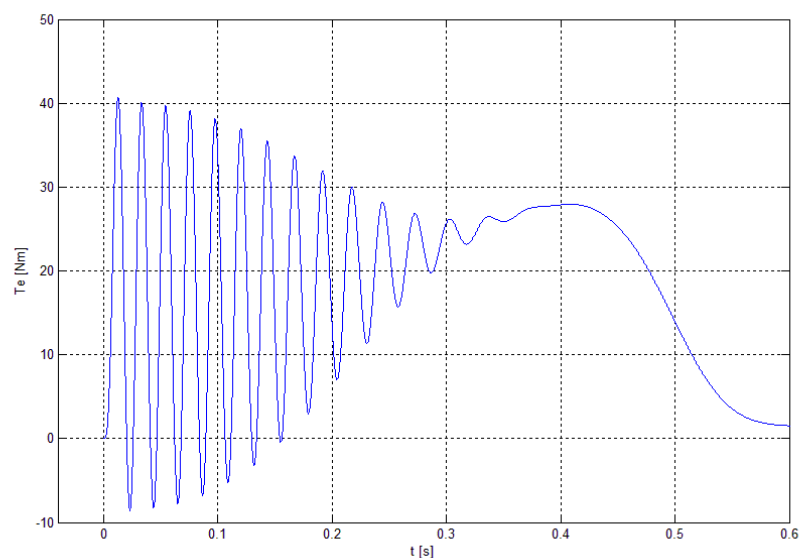
Obr. 1.21 Záznam osciloskopu při spouštění motoru se sníženým napětím 400 V v zapojení YY

Na zdroji v simulačním modelu jsem snížil výstupní napětí na 400 V a odsimuloval jsem průběh proudu v první fázi, kdy efektivní hodnota špičkového proudu $I_{I\delta}=36,8$ A, efektivní hodnota ustáleného proudu $I_{Iu}=1,4$ A. Čas rozběhu $t_r=550$ ms. Simulované a měřené průběhy se téměř shodují.



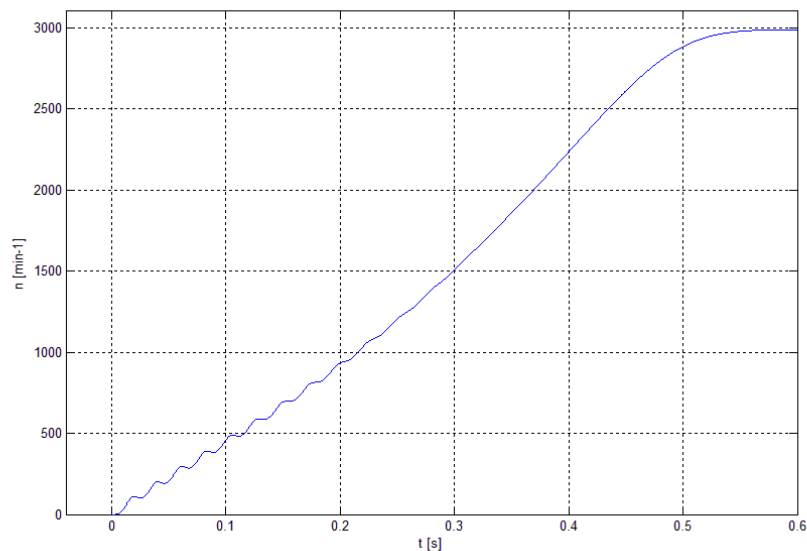
Obr. 1.22 Simulace proudu ve statoru při spouštění motoru v zapojení dvojitá hvězda při napájecím napětí 400 V

Průběh vnitřního elektromagnetického statorového momentu ve vzduchové mezeře je znázorněn na obr. 1.23. V porovnání s obr. 1.19, je pozorovatelný pokles momentové charakteristiky blíže ose x. Z grafu lze odečíst hodnotu momentu zvratu $T_e=28$ Nm, který nastává v čase $t_e=0,4$ s.



Obr. 1.23 Simulace elektromagnetického statorového momentu při napájení 400 V, zapojení vinutí YY

Průběh otáček v závislosti na čase je zobrazen na obr. 1.24, kdy se motor rozběhne za 0,55 s, poté si téměř bez zákmitu zachovává své otáčky naprázdno.



Obr. 1.24 Simulace průběhu otáček rotoru AM při zapojení vinutí do YY při sníženém napětí napájení 400 V

Vyhodnocení:

Tab. 1.3 Vyhodnocení zatěžování

Zapojení	M_n [Nm]	η [%]	s [%]	M_{mer} [Nm]	M_U [Nm]	M_I [Nm]
500V (Δ)	20	92	3,6	20,6	-	-
400V (Δ)	20,5	75	7,4	13,4	12,91	14
500V (YY)	13,3	76	3,4	12	-	-
400V (YY)	13,8	78	6,5	7,8	7,78	7,4

Při rozdílu napájení zůstal mechanický moment zachován, ale při sníženém napětí se výrazně zvýšila hodnota odebíraného proudu z efektivní hodnoty 4,6 A na efektivní hodnotu proudu 6,5 A. Účinnost v trojúhelníku při sníženém napětí výrazně klesla zatímco účinnost v zapojení vinutí do dvojité hvězdy i při změně napětí zůstala přibližně stejná. V obou případech se při snížení napájení zvětšil skluz asynchronního motoru.

Ve výpočtech (čísla vzorců) jsme provedli přepočty momentů pro snížené napětí a snížený proud. Takto přepočtené hodnoty momentů (M_U , M_I) jsem porovnal s naměřenými momentovými charakteristikami pro dané otáčky při daném napájecím napětí. Z porovnání vyplývá, že se tyto momenty téměř shodují.

Tab. 1.4 Vyhodnocení rozběhu

Zapojení	I_{1s} [A]	I_{1u} [A]	t_r [s]	T_e [Nm]	t_e [s]
500V (Δ)	31,8	2,1	0,12	-	-
400V (Δ)	28,3	1,4	0,2	-	-
500V (YY)	44,5	1,4	0,35	44	0,25
400V (YY)	36,8	1,4	0,55	28	0,4

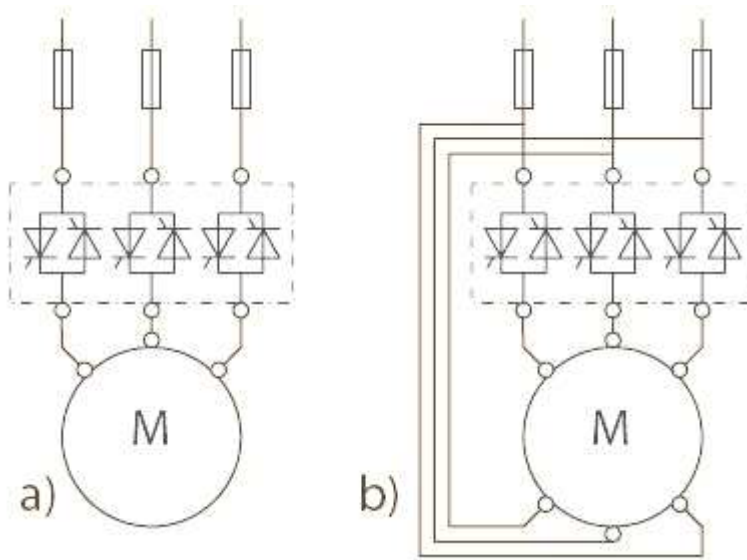
Porovnáním proudových špiček můžeme dojít k závěru, že při snížení napětí se nám sníží efektivní hodnota proudového rázu, ale prodlouží se nám čas rozběhu.

Pro zapojení YY jsem provedl simulaci, a z hodnot uvedených v tabulce 1.4 lze konstatovat, že elektromagnetický moment zvratu výrazně poklesl při sníženém napětí. Doba dosažení tohoto momentu se prodloužila.

2 Rozběh asynchronního motoru softstartérem

Další z možností, jak spouštět asynchronní motor, je spouštění softstartérem. Softstartér je sofistikované zařízení určené k plynulému rozběhu popřípadě doběhu asynchronních motorů. Plynulého rozběhu je docíleno prostřednictvím řízení napětí na svorkách motoru, přičemž frekvence sítě zůstává nezměněna. Regulace rozběhu/doběhu je napěťová, softstartér postupně zvyšuje/snižuje napětí v jednotlivých fázích. Softstartér se uplatňuje v širokém výkonovém rozmezí, a to od jednotek kilowattu (i jednofázové motory) až po jednotky megawatt.

Srdcem softstartéru jsou polovodičové prvky, tedy pro třífázový motor je softstartér tvořen třemi antiparalelními kombinacemi fázově řízených tyristorů (obr. 2.1). V případě, že motor má vinutí zapojeno do trojúhelníka, je možno softstartér zapojit uvnitř trojúhelníka (obr. 2.1b). Výhoda spočívá, oproti klasickému zapojení softstartéru v přívodu (obr. 2.1a), že řídíme napětí pouze ve vinutí, tedy softstartér je v tomto zapojení méně proudově namáhán, v tom případě ho není třeba tolik dimenzovat. Tohoto zapojení se s výhodou využívá, u softstartéru větších výkonů.

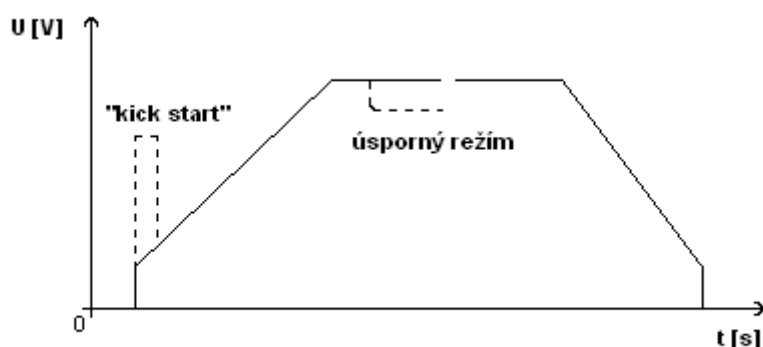


Obr. 2.1 Zapojení softstartéru a) v přívodu b) uvnitř trojúhelníku

Nevýhoda oproti srovnání s měničem frekvence je, že softstartér neumožňuje řízení otáček motoru a obvykle není ani dimenzován na trvalý provoz. Naopak jeho nespornou výhodou oproti měniči frekvence je jednoduchá konstrukce silového a řídicího obvodu a s tím související pořizovací cena, která je tímto nižší.

Softstartér je především využíván k rozběhu velkých setrvačných hmot a momentů setrvačnosti. Najdeme ho předřazen především před čerpadly, kompresory, ventilátory a hlavně u dopravníkových linek. Není vhodné softstartér používat tam, kde se očekává velký záběrný moment, který se blíží momentu nakrátko (jako je tomu třeba u důlních razicích strojů). Při jeho použití by mohlo dojít jak ke zničení softstartéru tak ke zničení ovládaného motoru.

Princip softstartéru spočívá v řízení rozběhové rampy, tedy postupným zvyšováním napětí v přívodu. Toto zvyšování napětí může probíhat lineárně, nebo po úsecích lineárně. Dokonalejšího rozběhu je však docíleno řízením rampy momentovým nebo proudovým regulátorem, tuto rampu si lze pak programově nastavit. Pro rozběh pohonů s velkým počátečním momentem je rozběhová rampa vybavena funkcí tzv. kick start. Jak je na obr. 2.2 vidět, tato funkce na začátku své rampy zvýší napětí na potřebnou velikost pro rozběh pohonu, a poté klesne na svou původní hodnotu rampy.



Obr. 2.2 Rozběhová a dojezdová rampa softstartéru

Po ukončení rozběhové rampy se může softstartér přemostit stykačem (tzv. bypass) tím ho můžeme buď použít pro další rozběh pohonů, např. v případě dopravníkových linek, nebo ho vypnout. Tím omezíme elektromagnetické rušení a výkonové ztráty. Další funkci, kterou softstartér nabízí je dojezdová rampa. Máme tedy možnost buď pohon doběhnout setrvačností sil (odpojení od sítě), nebo nastavit dojezdovou rampu. Dojezdová rampa je podobná té rozjezdové, prodloužení dojezdu je dosaženo postupným snižováním napětí.

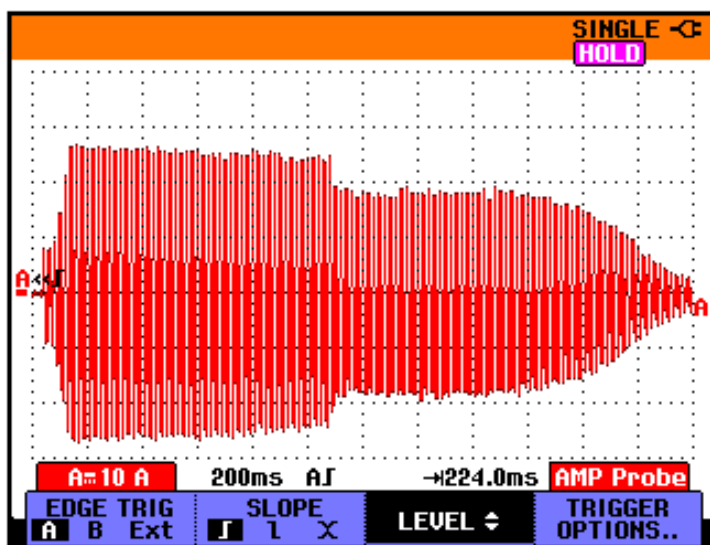
Softstartér nabízí i funkci úsporného provozu, nebo-li při malém zatížení nebo chodu naprázdno sníží napětí, tím odbudí motor a sníží odebíraný příkon ze sítě. Softstartér však musí být v tomto případě navržen pro trvalý provoz. Co se týče navržení softstartéru, je vhodné výběr správně uvážit, aby softstartér nebyl příliš naddimenzován. V takovémto

případě by se mohlo stát, že softstartér sice řídí rozběhovou rampu po nastavenou dobu, ale motor už je dávno rozběhnut do svých asynchronních otáček. To může být způsobeno malým zatížením pohonu nebo rozběhem naprázdno. Tento problém je řešitelný přes zpětnou vazbu v případě, že softstartér tuto možnost nabízí, kdy se rozběhová rampa upravuje sama v závislosti na pohonu a udržuje tak nastavenou dobu rampy.

2.1 Lineární rampa rozběhu 3 s (nezatížený, zapojení D, šířka pulzu 1 s, 400 V)

Na softstartéru jsem nastavil parametry pro rozběh motoru, a to lineární rampu rozběhu 3s a šířku pulzu - kick start – 1 s (ta je nastavena implicitně). Při měření byla použita standardní rampa, ačkoli softstartér umožňuje volbu více druhů rozběhových ramp. Ostatní parametry jsem nechal v továrním nastavení. Softstartér je konstruován pro síťové napětí 400V, sledoval jsem proudové zatížení na první fázi.

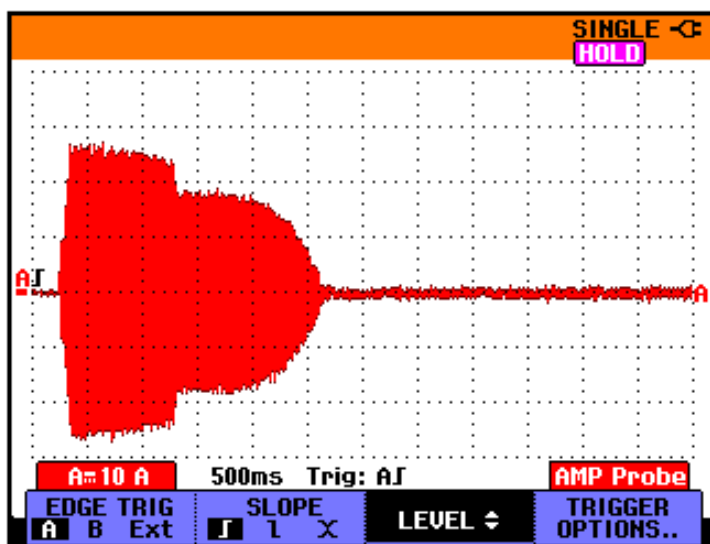
V pořízeném záznamu (obr. 2.3) je vidět průběh proudu na fázi I₁ a jeho efektivní špičková hodnota $I_{I\delta}=18,4$ A. V první sekundě rozběhu je asynchronní motor pod vlivem tzv. kick startu (šířka pulzu 1s), poté se proud stáhne na efektivní hodnotu $I_{I\delta\delta}=12,7$ A. Doba rozběhu motoru činí $t_r=2,5$ s, poté motor dosáhl konstantních otáček a proud se ustálil. Délka zobrazeného záznamu nám již neumožňuje přesně určit velikost ustálené hodnoty proudu, avšak jeho předpokládaná efektivní hodnota je $I_{Iu}=0,4$ A.



Obr. 2.3 Záznam osciloskopu: šířka pulzu 1s, čas rozběhové rampy 3 s

2.2 Lineární rampa rozběhu 5 s (nezatížený, zapojení D, šířka pulzu 1 s, 400 V)

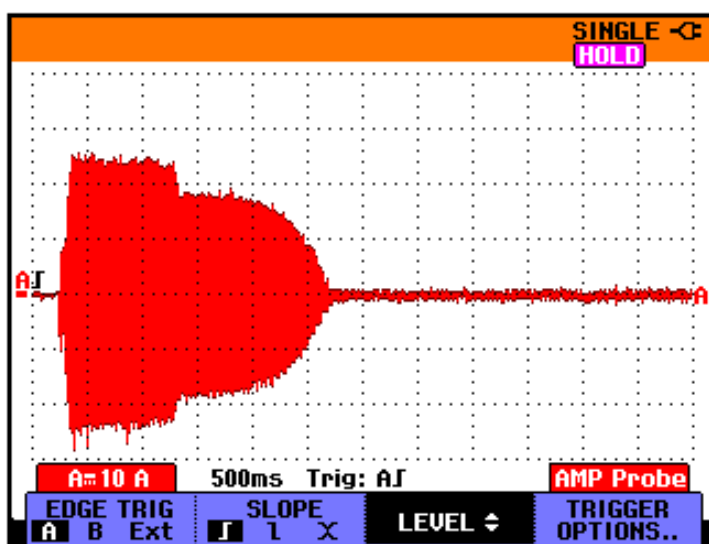
Rampu softstárteru jsem nastavil na 5 s a šířku pulzu ponechal na 1 s. Z průběhu (obr. 2.4.) lze vidět, že efektivní velikosti proudů $I_{Is}=18,4$ A, $I_{Iss}=12,7$ A, $I_{Iu}=0,4$ A a doba rozběhnutí $t_r=2,5$ s. Zde už je pozorovatelný jev, popsáný již v úvodu kapitoly 2, tedy že nezatížený asynchronní motor má tendenci se rozběhnout do svých jmenovitých otáček, a to co nejrychleji. Pro potvrzení tohoto konstatování jsem provedl ještě další měření, viz kapitola 2.3.



Obr. 2.4 Záznam osciloskopu: šířka pulzu 1 s, čas rozběhové rampy 5 s

2.3 Lineární rampa rozběhu 10 s (nezatížený, zapojení D, šířka pulzu 1 s, 400 V)

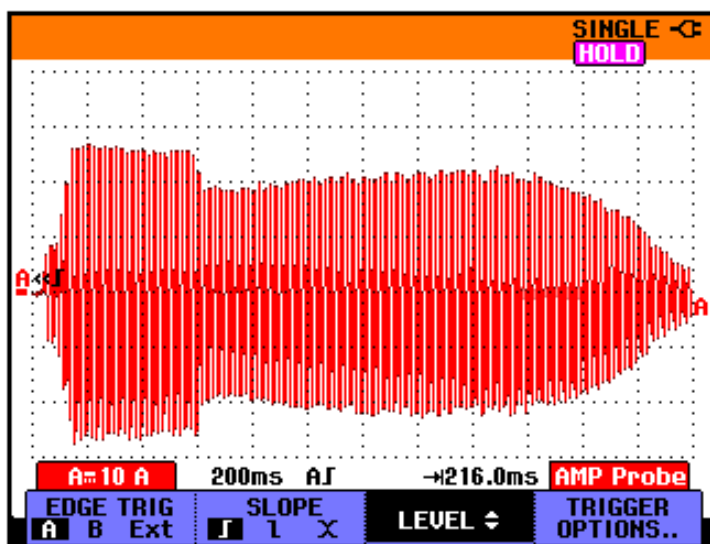
Toto měření sloužilo především pro potvrzení výše zmíněného konstatování. Z průběhu osciloskopu (obr. 2.5) nelze pozorovat žádné zásadní rozdíly oproti záznamu na obr. 2.4. Efektivní hodnoty proudů dosahovaly $I_{Is}=18,4$ A, $I_{Iss}=12,7$ A, $I_{Iu}=0,4$ A a doba rozběhnutí $t_r=2,5$ s. Nyní můžeme potvrdit, že nastavení rampy má zásadní dopad na rozběh motoru. Velmi nepříznivé je pak nastavování časově řízené napěťové rampy do nereálných časů.



Obr. 2.5 Záznam osciloskopu: šířka pulzu 1 s, čas rozběhové rampy 10 s

2.4 Lineární rampa rozběhu 3 s (nezatížený, zapojení D, šířka pulzu 0,5 s, 400 V)

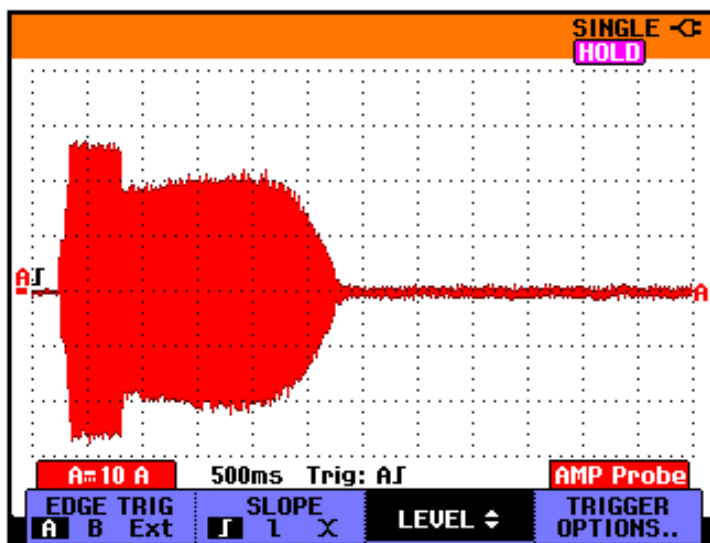
Pro toto měření jsem v menu softstartéru nastavil čas lineární rampy rozběhu na 3s, přičemž jsem její průběh nechal na továrním nastavení jako tomu bylo v předchozích měřeních. Dále jsem šířku pulzu zkrátil na 0,5 s a sledoval jsem vliv této změny na průběh rozběhu, abych mohl porovnat naměřené hodnoty s 3-mi předchozími měřeními. Z grafu (obr. 2.6), lze odečíst následující efektivní hodnoty proudů $I_{I\dot{s}}=18,4$ A, $I_{I\ddot{s}}=15,6$ A, předpokládaný efektivní ustálený proud $I_{Iu}=0,4$ A a doba rozběhnutí $t_r=2,8$ s.



Obr. 2.6 Záznam osciloskopu: šířka pulzu 0,5 s, čas rozběhové rampy 3 s

2.5 Lineární rampa rozběhu 5 s (nezatížený, zapojení D, šířka pulzu 0,5 s, 400 V)

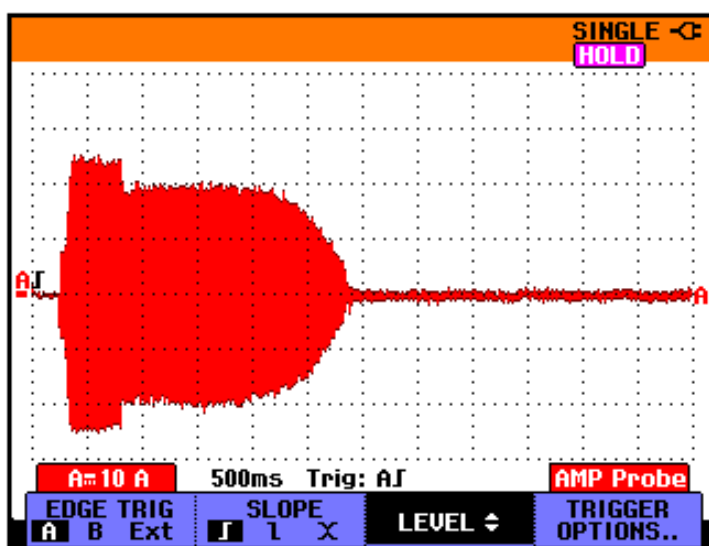
Pro toto měření šířka pulzu zůstala zachována na 0,5 s a lineární rampu rozběhu jsem nastavil na 5 s. V průběhu (obr. 2.7) jsou efektivní hodnoty proudů $I_{Is}=18,4$ A, $I_{Iss}=14,1$ A, $I_{Iu}=0,4$ A a doba rozběhnutí $t_r=3$ s.



Obr. 2.7 Záznam osciloskopu: šířka pulzu 0,5 s, čas rozběhové rampy 5 s

2.6 Lineární rampa rozběhu 10 s (nezatížený, zapojení D, šířka pulzu 0,5 s, 400 V)

Pro toto měření šířka pulzu zůstala zachována na 0,5 s, lineární rampu rozběhu jsem nastavil na 10 s. V průběhu (obr. 2.8) jsou efektivní hodnoty proudu $I_{Is}=18,4$ A, $I_{Iss}=14,1$ A, $I_{Iu}=0,4$ A a doba rozběhnutí $t_r=3$ s.



Obr. 2.8 Záznam osciloskopu: šířka pulzu 0,5 s, čas rozběhové rampy 10 s

Vyhodnocení:

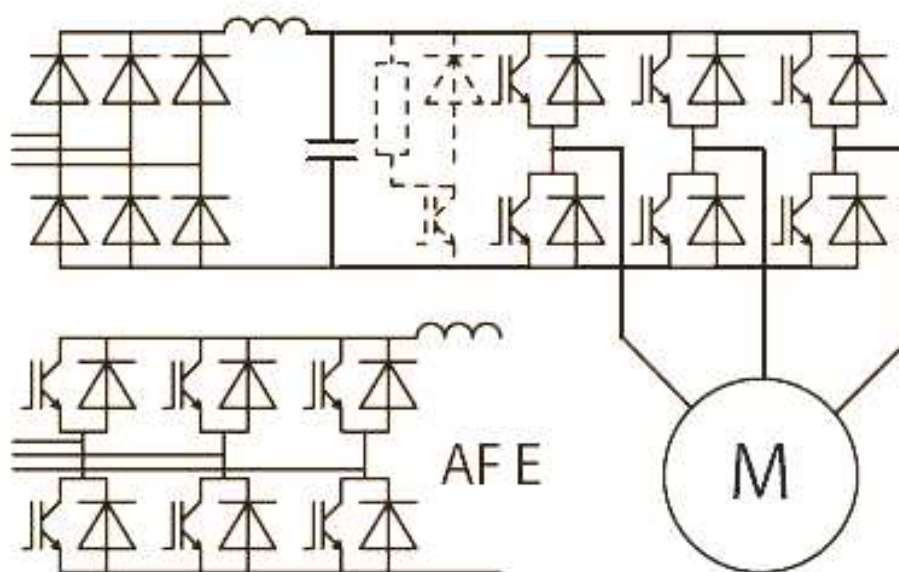
Tab. 2.1 Tabulka naměřených hodnot, pro jednotlivé nastavení softstartéru

Nastavení softstartéru	I_{1s} [A]	I_{1ss} [A]	I_{1u} [A]	t_r [s]
rampa 3s/1s	18,4	12,7	0,4	2,5
rampa 5s/1s	18,4	12,7	0,4	2,5
rampa 10s/1s	18,4	12,7	0,4	2,5
rampa 3s/0,5s	18,4	15,6	0,4	2,8
rampa 5s/0,5s	18,4	14,1	0,4	3
rampa 10s/0,5s	18,4	14,1	0,4	3

K vyhodnocení naměřených průběhů je možné použít tabulku 2.1. Z ní je možno konstatovat, že neúměrné přetahování délky rozběhu, nemá žádný efekt, protože motor naprázdno (nedostatečně zatížený) má tendenci se rozběhnout rychle a hladce. Nastavení šířky pulzu v našem případě nemělo na významu, poněvadž byl motor spouštěn naprázdno a nebyl tedy pod vlivem zátěže. Významem měření se změnou šířky pulzu bylo demonstrování, že při zkrácení šířky pulzu došlo k nepatrnému růstu I_{1ss} a prodloužení rozběhu. Softstartér v našich podmínkách byl taktéž naddimenzován, což se projevilo ve výsledcích měření.

3 Rozběh asynchronního motoru pomocí frekvenčního měniče

Tato kapitola je věnována rozběhu asynchronního motoru za pomoci frekvenčního měniče. Frekvenční měnič je velice složité zařízení, sloužící k regulaci otáček, krouticího momentu, rozběhu a doběhu asynchronních motorů s kotvou nakrátko. Řízení těchto veličin se děje za pomoci současného řízení napětí a frekvence na svorkách pohonu. K tomuto účelu se nejčastěji využívá nepřímého napět'ového měniče frekvence, který se skládá z usměrňovače, ss meziobvodu a tranzistorového střídače (obr. 3.1).



Obr. 3.1 Zapojení nepřímého napět'ového měniče frekvence

První část frekvenčního měniče, síťový usměrňovač, je ve většině případů diodový/neřízený. V stejnosměrné části meziobvodu se nachází filtrační kondenzátor sloužící k vyhlazení zvlněného usměrněného napětí, dále tam je tlumivka, která má za úkol tlumit proudové rázy, které vznikají v případě zapojení nenabitého kondenzátoru. Tlumivka nám dále zlepšuje účinnost, a to díky omezení harmonických. V poslední části frekvenčního měniče se nachází tranzistorový střídač, který nám pomocí PWM (Pulse Width Modulation – pulzně šířková modulace) tvaruje nový sinusový průběh výstupního napětí a řídí jeho frekvenci a efektivní hodnotu.

Starší frekvenční měniče byly určeny k tzv. skalárnímu řízení, které vychází z principu indukčního zákona.

$$U_1 \approx \phi \cdot f_1 \quad (3.1)$$

Aby při regulaci frekvence nedocházelo ke změnám sycení stroje (změna velikosti hodnoty Φ), musí být předpoklad, že:

$$\phi = konst.$$

neboli:

$$\frac{U_1}{f_1} = konst. \quad (3.2)$$

Z toho vyplývá, že při změně frekvence (snížení) dochází i k regulaci napětí (snížení). Přičemž velikost výstupního kmitočtu je prakticky neomezená, tedy od nuly až do frekvencí přesahujících jmenovitou frekvenci stroje, v případě, že to připustí mechanická konstrukce pohonu. Jako u softstartéru lze frekvenčním měničem nastavit rozběhovou rampu přičemž je zde výhoda současného nastavení frekvence v závislosti na napětí, tedy zachování konstantního poměru, který se rovná magnetickému toku.

Pokud je od pohonu požadováno brzdění, může měnič frekvence nabídnout:

- brzdění stejnosměrným proudem, kdy střídač je řízen tak, aby fázemi motoru protékal stejnosměrný proud stanovené hodnoty; nevýhodou je, že celá kinetická energie brzděného pohonu se změní v teplo uvnitř brzděného motoru;
- brzdění do odporu, kdy motor pracuje v nadsynchronní oblasti jako generátor, jehož vyráběná energie se mění v teplo v řízeném odporu (na obrázku naznačen v stejnosměrném meziobvodu čárkovane spolu s periodicky spínaným tranzistorem a nulovou diodou); brzdny odpor může být součástí měniče, u větších výkonů je zpravidla externí;
- brzdění rekuperační, kdy motor opět pracuje v nadsynchronní oblasti jako generátor, avšak jeho vyráběná energie je rekuperována do napájecí sítě; v tomto případě ovšem musí být místo diodového usměrňovače použit usměrňovač tranzistorový, umožňující pulzně šířkovou modulaci dodávku sinusového proudu do sítě – na obrázku naznačená varianta síťového usměrňovače označená jako AFE (Active Front End). [3]

Měniče samy o sobě, a tím i celý elektrický pohon, který je obsahuje, tedy představují komplikovanou kvazispojitou soustavu, což znamená, že tato soustava má za úkol předávat energii nebo informaci o řízení a ve které se jedna nebo několik vstupních spojitých veličin mění na jednu či několik výstupních spojitých veličin, přičemž uvnitř soustavy dochází k nespojitým změnám stavu (vzorkování) jednotlivých prvků soustavy.

[4]

3.1 Zapojení asynchronního motoru do trojúhelníka

3.1.1 Frekvence 10 Hz napětí 76 V, f-měnič spuštěn

Na frekvenčním měniči jsme nastavili výstupní frekvenci 10 Hz, přičemž f-měnič si sám nastavil výstupní napětí 76 V a to podle vztahu (3.2). Frekvenční měnič vychází ze svých hodnot pro své maximální napětí 380 V, lze tedy určit jeho poměr

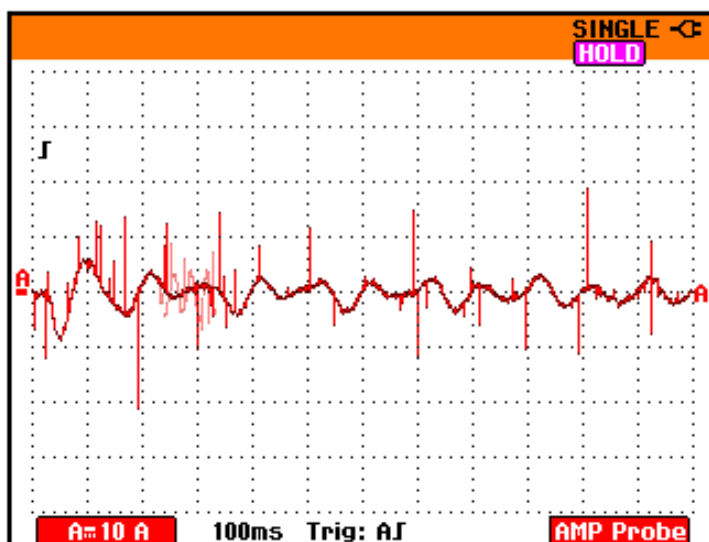
$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{380}{50} = 7,6 = konst. \quad (3.3)$$

z kterého můžeme spočítat napětí, při zadané frekvenci 10Hz

$$U_{10} = 7,6 \cdot 10 = 76 \text{ V}$$

Asynchronní motor jsme připojili k spuštěnému frekvenčnímu měniči. Na obr. 3.2 je vidět záznam z rozběhu asynchronního motoru pro zmíněné parametry. Ze záznamu vidíme, že efektivní špičková hodnota proudu je $I_{Is}=4,2 \text{ A}$ a ustálená efektivní hodnota proudu je $I_{Iu}=2,1 \text{ A}$. Doba rozběhu asynchronního motoru je $t_r=0,2 \text{ s}$. Otáčky statorového magnetického pole jsou

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 10}{2} = 300 \text{ min}^{-1} \quad (3.4)$$



Obr. 3.2 Záznam osciloskopu pro průběh proudu na první fázi pro nastavenou frekvenci 10 Hz a napětí 76 V, při zapojení motoru do trojúhelníka

3.1.2 Frekvence 25 Hz napětí 190 V, f-měnič spuštěn

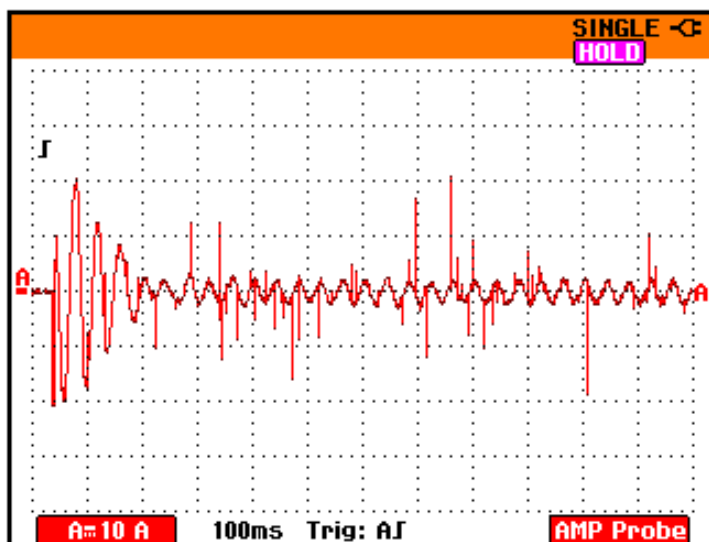
Na frekvenčním měniči jsme nastavili výstupní frekvenci 25 Hz, přičemž f-měnič si sám nastavil výstupní napětí 190 V a to podle vztahu (3.2). Frekvenční měnič vychází ze svých hodnot pro své maximální napětí 380 V, z předchozí kapitoly už převodový poměr známe. Nyní stačí dosadit do vztahu (3.3)

Z převodového poměru můžeme spočítat napětí, při zadané frekvenci 25 Hz

$$U_{25} = 7,6 \cdot 25 = 190 \text{ V}$$

Asynchronní motor jsme připojili k spuštěnému frekvenčnímu měniči. Na obr. 3.3 je vidět záznam z rozběhu asynchronního motoru pro zmíněné parametry. Ze záznamu vidíme, že efektivní špičková hodnota proudu je $I_{ls}=14,1 \text{ A}$ a ustálená efektivní hodnota proudu je $I_{lu}=1,4 \text{ A}$. Doba rozběhu asynchronního motoru je $t_r=0,25 \text{ s}$. Otáčky statorového magnetického pole jsou

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 25}{2} = 750 \text{ min}^{-1} \quad (3.5)$$



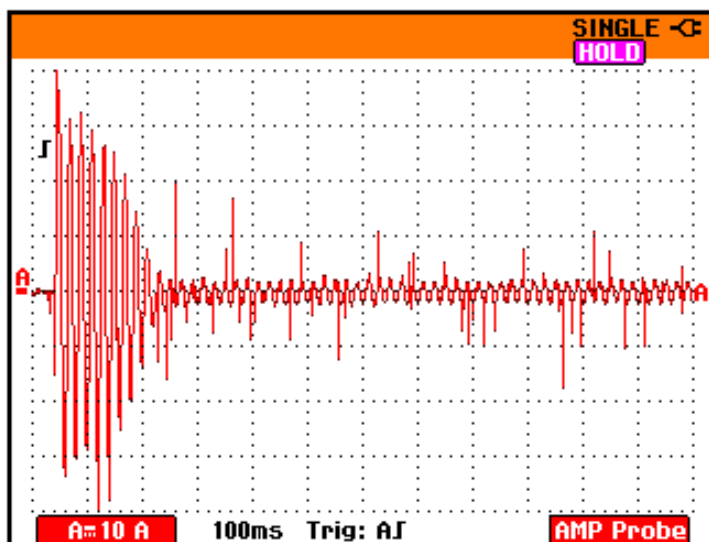
Obr. 3.3 Záznam osciloskopu pro průběh proudu na první fázi pro nastavenou frekvenci 25 Hz a napětí 190 V, při zapojení motoru do trojúhelníka

3.1.3 Frekvence 50 Hz napětí 380 V, f-měnič spuštěn

Na frekvenčním měniči jsme nastavili výstupní frekvenci 50 Hz, přičemž f-měnič je limitován maximálním napětím 380V, které si sám nyní nastavil.

Asynchronní motor jsme připojili k spuštěnému frekvenčnímu měniči. Na obr. 3.4 je vidět záznam z rozběhu asynchronního motoru pro zmíněné parametry. Ze záznamu vidíme, že efektivní špičková hodnota proudu je $I_{Is}=22,6$ A a ustálená efektivní hodnota proudu je $I_{Iu}=1,4$ A doba rozběhu asynchronního motoru je $t_r=0,2$ s. Otáčky statorového magnetického pole jsou

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (3.6)$$



Obr. 3.4 Záznam osciloskopu pro průběh proudu na první fázi pro nastavenou frekvenci 50 Hz a napětí 380 V, při zapojení motoru do trojúhelníka

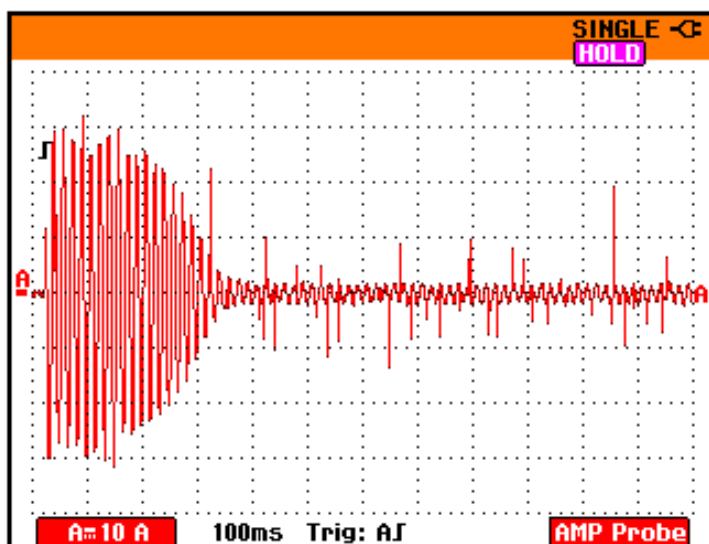
3.1.4 Frekvence 60 Hz napětí 380 V, f-měnič spuštěn

V tomto případě nemůžeme dodržet, vztahu (3.2), frekvenční měnič je totiž konstruován na napětí 380 V. Poměr napětí k frekvenci se změní místo původních 7,6 na:

$$\frac{U_{60}}{f_{60}} = \frac{380}{60} = 6,33 \quad (3.7)$$

Ze záznamu (obr.3.5) můžeme vidět, že efektivní rázový proud $I_{Is}=22,6$ A a doba rozběhu je $t_r=0,38$ s přičemž ustálený efektivní proud $I_{Iu}=1,4$ A. Otáčky statorového magnetického pole jsou

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 60}{2} = 1800 \text{ min}^{-1} \quad (3.8)$$

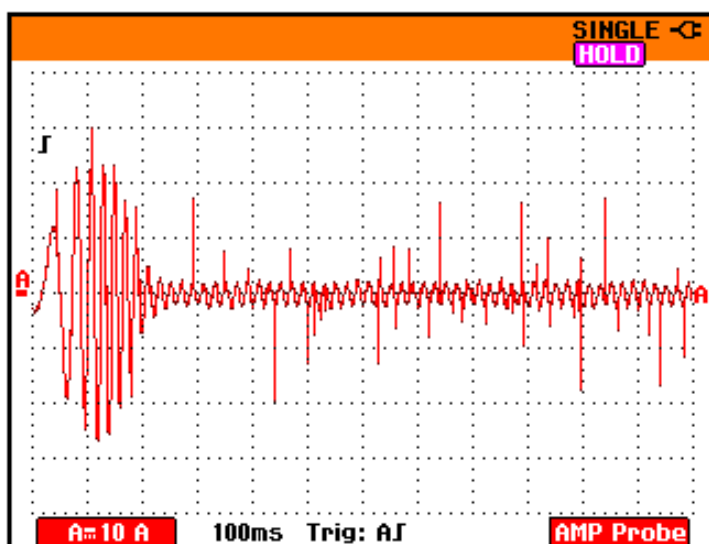


Obr. 3.5 Záznam osciloskopu pro průběh proudu na první fázi pro nastavenou frekvenci 60 Hz a napětí 380 V, při zapojení motoru do trojúhelníka

3.1.5 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,2 s

Pro tuto kapitolu jsem nyní asynchronní motor rozbíhal přes frekvenční měnič a to tak, že jsem využil funkce rozběhové rampy. Frekvenční měnič v tomto případě upravuje rozběh motoru tak aby byl zachován magnetický tok konstantní.

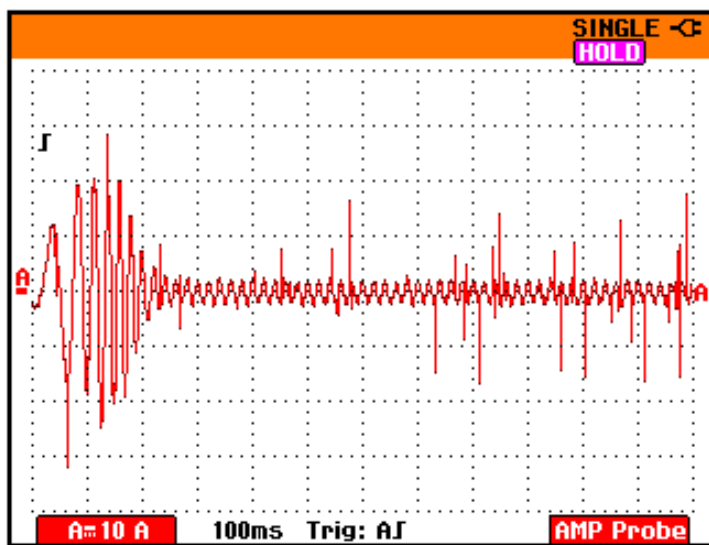
Z pořízeného záznamu (obr. 3.6) můžeme vidět jak během rozběhu motoru, tak frekvence proudu v první fázi roste a zároveň roste i špičková hodnota proudu. Lze tedy konstatovat, že efektivní hodnota špičkového proudu v první fázi $I_{Is}=19,8$ A, efektivní hodnota ustáleného proudu v první fázi $I_{Iu}=1,4$ A a doba rozběhu pro asynchronní motor je $t_r=0,22$ s.



Obr. 3.6 Záznam spouštění: rozběhová rampa 0,2 s, zapojení vinutí D

3.1.6 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,3 s

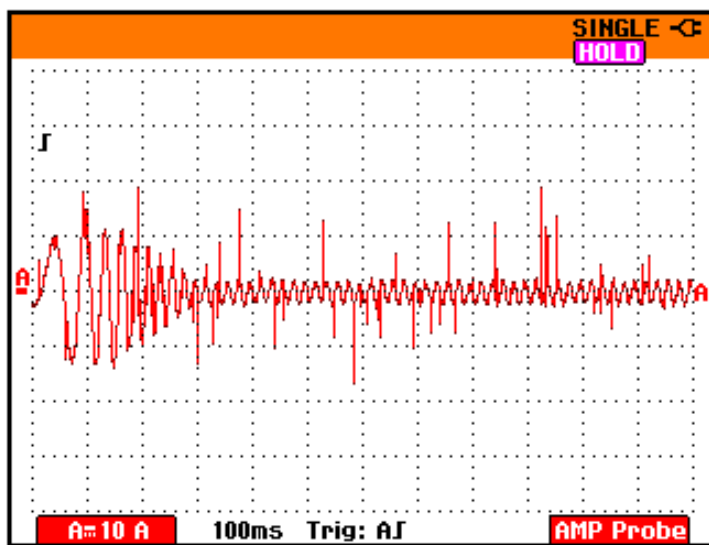
Pro toto měření jsme na frekvenčním měniči upravili délku rozběhové rampy z 0,2 s na 0,3 s a pořídili jsme záznam průběhu proudu v první fázi. Ze záznamu (obr. 3.7) určíme efektivní hodnotu špičkového proudu $I_{I\delta}=17,7\text{ A}$, efektivní hodnotu ustáleného proudu $I_{Iu}=1,4\text{ A}$ a dobu rozběhu motoru $t_r=0,25\text{ s}$.



Obr. 3.7 Záznam spouštění: rozběhová rampa 0,3 s, zapojení vinutí D

3.1.7 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,4 s

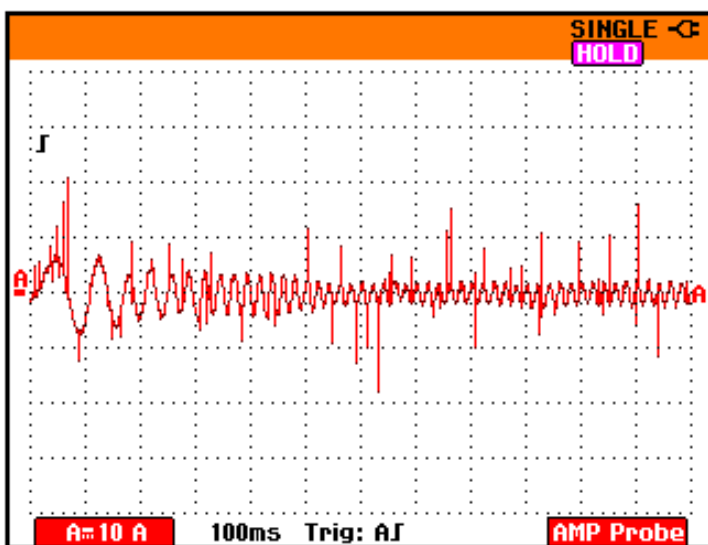
Pro toto měření jsme na frekvenčním měniči upravili délku rozběhové rampy z 0,3 s na 0,4 s a pořídili jsme záznam průběhu proudu v první fázi. Ze záznamu (obr. 3.8) určíme efektivní hodnotu špičkového proudu $I_{I\delta}=10,6\text{ A}$, efektivní hodnotu ustáleného proudu $I_{Iu}=1,4\text{ A}$ a dobu rozběhu motoru $t_r=0,3\text{ s}$.



Obr. 3.8 Záznam spouštění: rozběhová rampa 0,4 s, zapojení vinutí D

3.1.8 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,8 s

Pro toto měření jsme na frekvenčním měniči upravili délku rozběhové rampy z 0,4 s na 0,8 s a pořídili jsme záznam průběhu proudu v první fázi. Ze záznamu (obr. 3.9) určíme efektivní hodnotu špičkového proudu $I_{Is}=5,7$ A , efektivní hodnotu ustáleného proudu $I_{Iu}=1,4$ A a dobu rozběhu motoru $t_r=0,55$ s. Na tomto záznamu lze vidět jak postupně frekvence proudu první fáze roste, až na hodnotu 50 Hz.



Obr. 3.9 Záznam spouštění: rozběhová rampa 0,8 s, zapojení vinutí D

3.2 Zapojení asynchronního motoru do dvojité hvězdy

3.2.1 Frekvence 10 Hz napětí 76 V, f-měnič spuštěn, simulace

Na frekvenčním měniči jsme nastavili výstupní frekvenci 10 Hz, přičemž f-měnič si sám nastavil výstupní napětí 76 V podle vztahu (3.2). Frekvenční měnič vychází ze svých hodnot pro své maximální napětí 380 V, lze tedy určit poměr

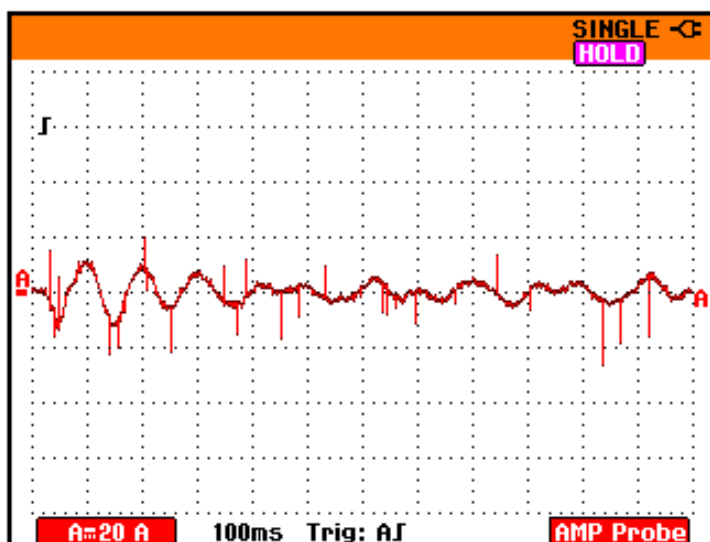
$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{380}{50} = 7,6 = konst. \quad (3.9)$$

z kterého můžeme spočítat napětí, při zadané frekvenci 10 Hz

$$U_{10} = 7,6 \cdot 10 = 76 \text{ V}$$

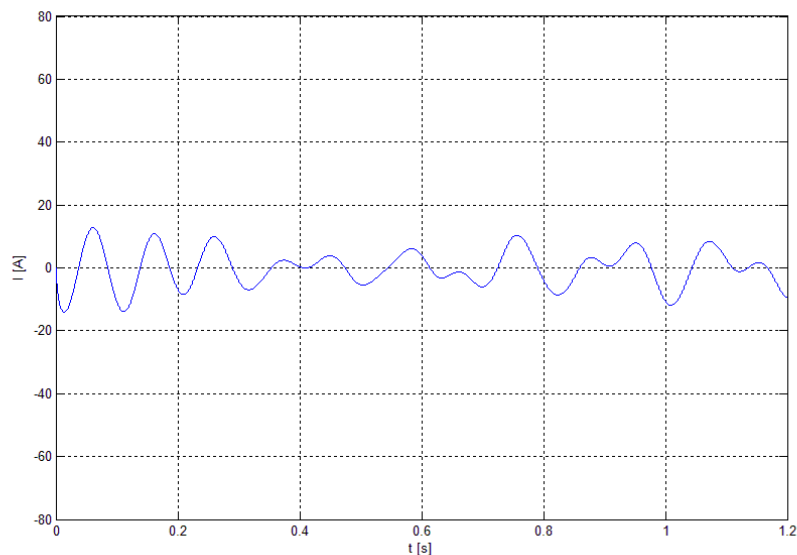
Asynchronní motor jsme připojili k spuštěnému frekvenčnímu měniči. Na obr. 3.10 je vidět záznam z rozběhu asynchronního motoru pro zmíněné parametry. Ze záznamu vidíme, že efektivní špičková hodnota proudu je $I_{Is}=8,5 \text{ A}$ a ustálená efektivní hodnota proudu nelze pro frekvenci 10 Hz určit, doba rozběhu asynchronního motoru je $t_r=0,4 \text{ s}$. Otáčky statorového magnetického pole jsou

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 10}{1} = 600 \text{ min}^{-1} \quad (3.10)$$



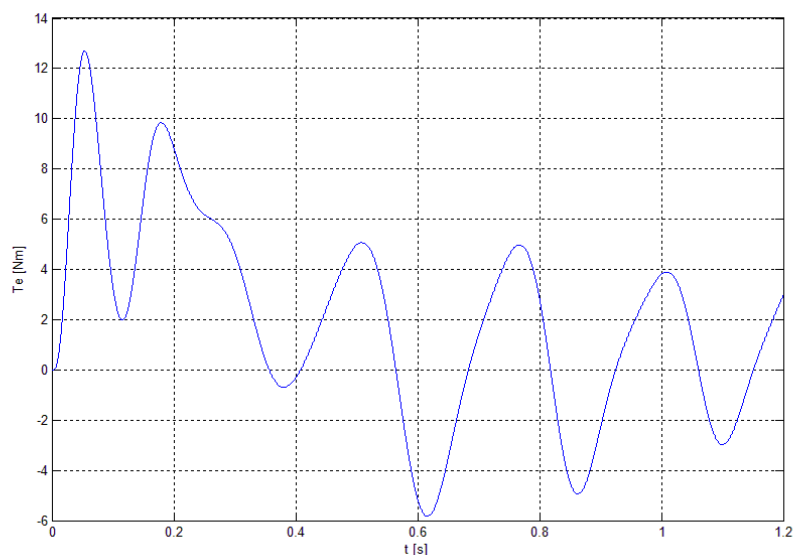
Obr. 3.10 Záznam osciloskopu pro průběh proudu na první fázi pro nastavenou frekvenci 10 Hz a napětí 76 V, při zapojení motoru do dvojité hvězdy

Pro výše zmíněné parametry jsem provedl simulaci. Simulovaný proud první fáze (obr. 3.11) se podobá skutečnému proudu ve vodiči v první fázi (obr. 3.10). Můžeme si však povšimnout jeho kolísání a znovu narůstání.



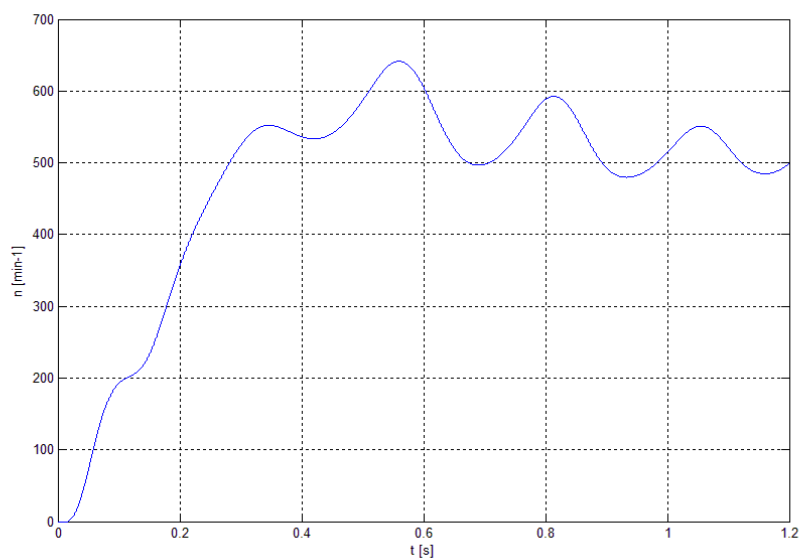
Obr. 3.11 Simulace průběhu proudu první fáze při $U=76$ V, $f=10$ Hz a zapojení vinutí do YY

V simulaci průběhu (obr. 3.12) elektromagnetického statorového momentu je vidět, že moment kolísá mezi kladnou a zápornou hodnotou, to má za důsledek kolísání otáček jak lze vidět v následující simulaci.



Obr. 3.12 Simulace průběhu elektromagnetického statorového momentu při $U=76$ V, $f=10$ Hz a zapojení vinutí do YY

Ze simulace otáček na rotoru (obr. 3.13), je pozorovatelný rozběh asynchronního motoru do svých synchronních otáček za čas 0,5 s pak otáčky následně začínají padat. Ze simulovaných hodnot a částečně i z naměřené hodnoty, můžeme konstatovat, že v tomto případě je frekvence napájení 10 Hz kritická.



Obr. 3.13 Simulace průběhu rotorových otáček při $U=76$ V, $f=10$ Hz a zapojení vinutí do YY

3.2.2 Frekvence 25 Hz napětí 190 V, f-měnič spuštěn, simulace

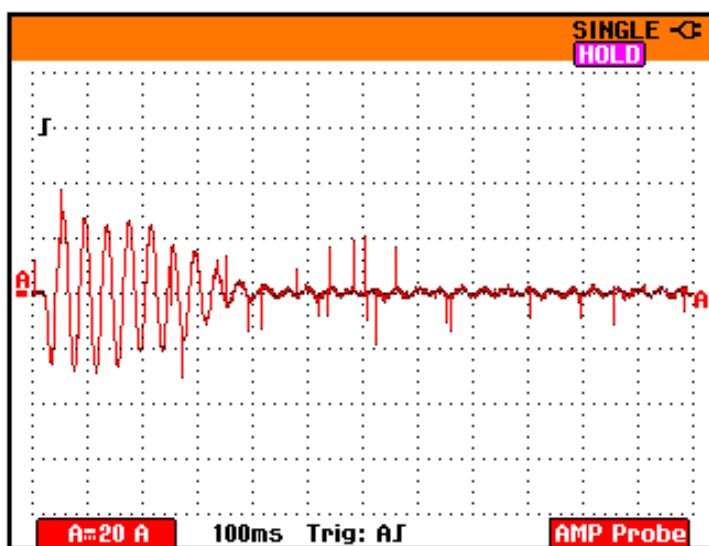
Na frekvenčním měniči jsme nastavili výstupní frekvenci 25 Hz, přičemž f-měnič si sám nastavil výstupní napětí 190 V a to podle vztahu (3.2). Frekvenční měnič vychází ze svých hodnot pro své maximální napětí 380 V. Z předchozí kapitoly už převodový poměr známe. Nyní stačí dosadit do vztahu (3.9)

Z převodového poměru můžeme spočítat napětí, při zadané frekvenci 25 Hz

$$U_{25} = 7,6 \cdot 25 = 190 \text{ V}$$

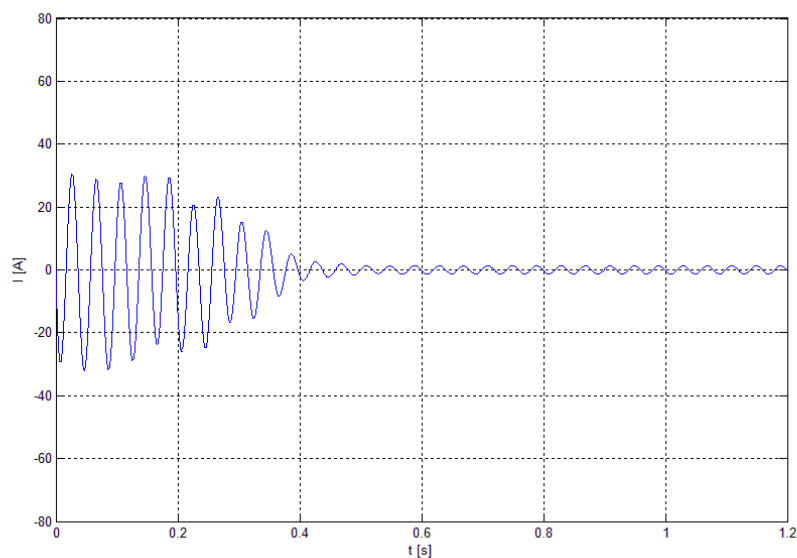
Asynchronní motor jsme připojili k spuštěnému frekvenčnímu měniči. Na obr. 3.14 je vidět záznam z rozběhu asynchronního motoru pro zmíněné parametry. Ze záznamu vidíme, že efektivní špičková hodnota proudu je $I_{I\delta}=21,2 \text{ A}$ a ustálená efektivní hodnota proudu je $I_{Iu}=2,8 \text{ A}$. Doba rozběhu asynchronního motoru je $t_r=0,4 \text{ s}$. Otáčky statorového magnetického pole jsou

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 25}{1} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (3.11)$$



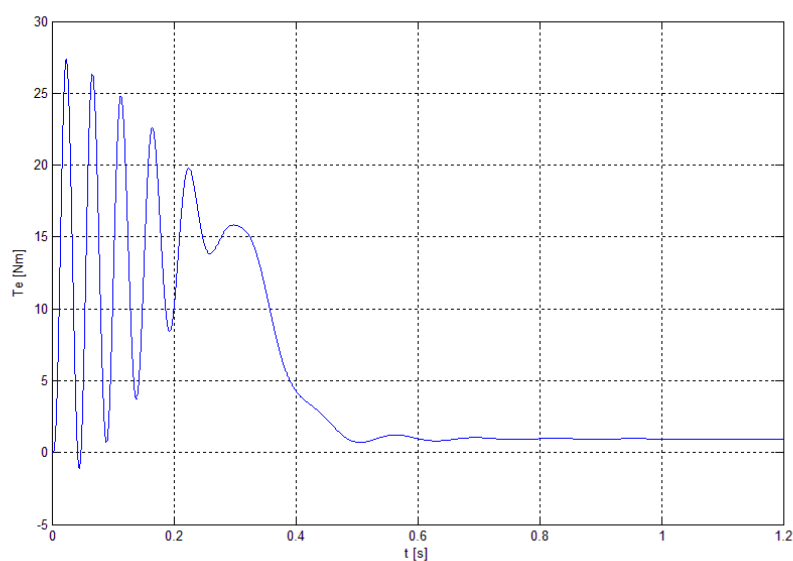
Obr. 3.14 Záznam osciloskopu pro průběh proudu na první fázi pro nastavenou frekvenci 25 Hz a napětí 190 V, při zapojení motoru do dvojité hvězdy

Při konfrontování simulací proudu v první fázi (Obr. 3.15) pro napětí 190 V a jeho frekvenci 25 Hz, se skutečným měřením lze konstatovat, že průběhy jsou téměř totožné.



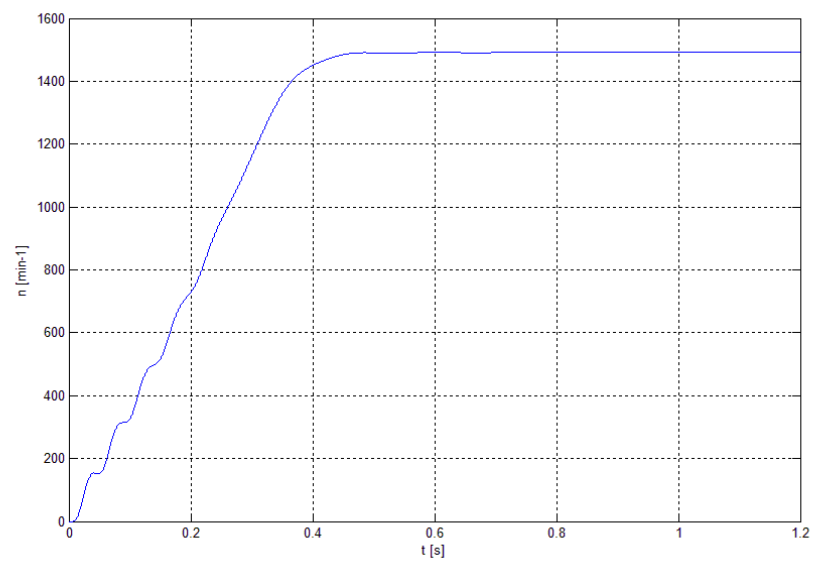
Obr. 3.15 Simulace průběhu proudu první fáze při $U=190$ V, $f=25$ Hz a zapojení vinutí do YY

V simulaci průběhu (obr. 3.16) elektromagnetického momentu je pozorovatelné, že moment zvratu $T_e=16$ Nm, kterého motor dosáhl v čase $t_e=0,3$ s poté moment klesl a po pár zákmitech se ustálil na hodnotě 2 Nm.



Obr. 3.16 Simulace průběhu elektromagnetického statorového momentu při $U=190$ V, $f=25$ Hz a zapojení vinutí do YY

Ze simulace otáček na rotoru (obr. 3.17), je pozorovatelný rozběh asynchronního motoru do svých téměř synchronních otáček za čas 0,45 s, poté se otáčky ustálí na konstantní hodnotě.



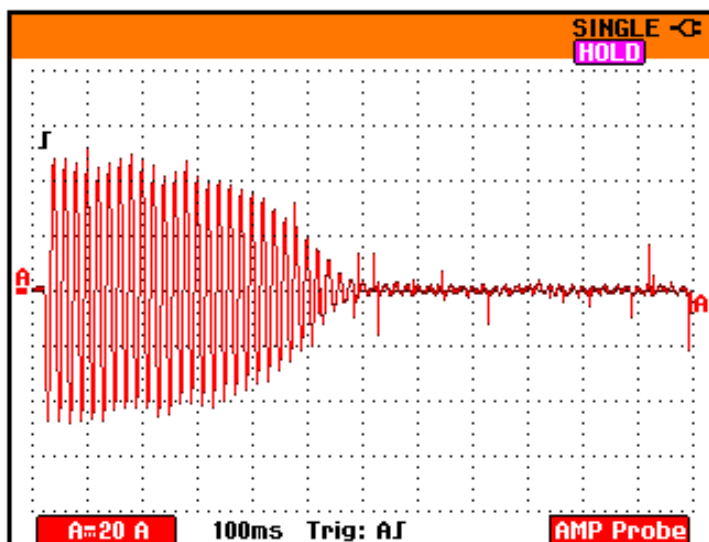
Obr. 3.17 Simulace průběhu rotorových otáček při $U=190$ V, $f=25$ Hz a zapojení vinutí do YY

3.2.3 Frekvence 50 Hz napětí 380 V, f-měnič spuštěn, simulace

Na frekvenčním měniči jsme nastavili výstupní frekvenci 50 Hz, přičemž f-měnič je limitován maximálním napětím 380 V, které si sám nyní nastavil.

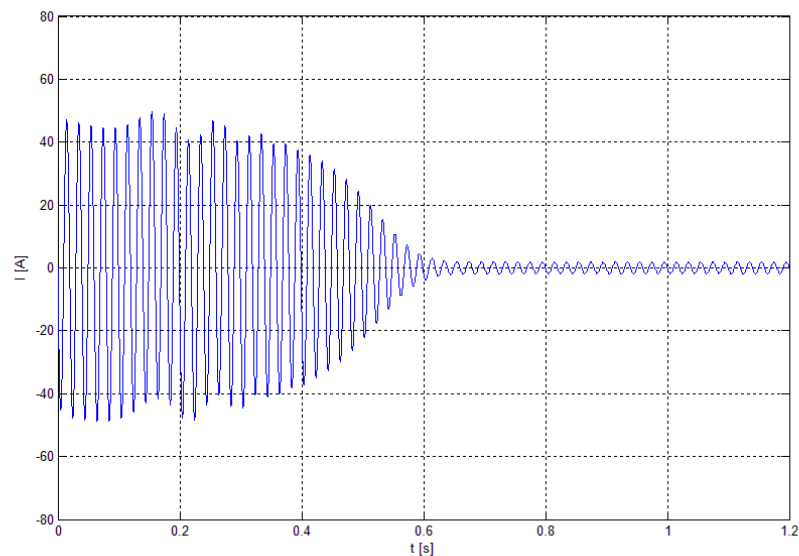
Asynchronní motor jsme připojili k spuštěnému frekvenčnímu měniči. Na obr. 3.4 je vidět záznam z rozběhu asynchronního motoru pro zmíněné parametry. Ze záznamu (obr. 3.18) vidíme, že efektivní špičková hodnota proudu je $I_{Is}=35,4$ A a ustálená efektivní hodnota proudu je $I_{Iu}=2,8$ A doba rozběhu asynchronního motoru je $t_r=0,6$ s. Otáčky statorového magnetického pole jsou

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ min}^{-1} \quad (3.12)$$



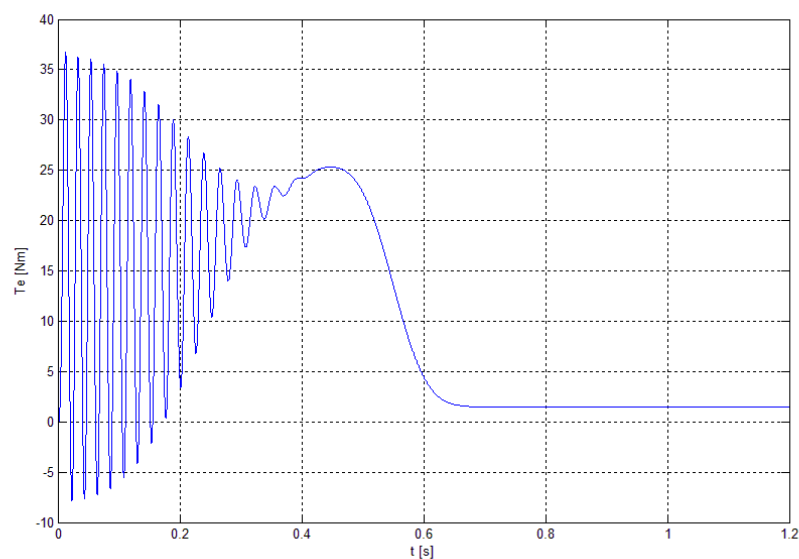
Obr. 3.18 Záznam osciloskopu pro průběh proudu na první fázi pro nastavenou frekvenci 50 Hz a napětí 380 V, při zapojení motoru do dvojité hvězdy

Při konfrontování simulaci proudu v první fázi (Obr. 3.19) pro napětí 380 V a jeho frekvenci 50 Hz, se skutečným měřením lze konstatovat, že průběhy jsou téměř totožné.



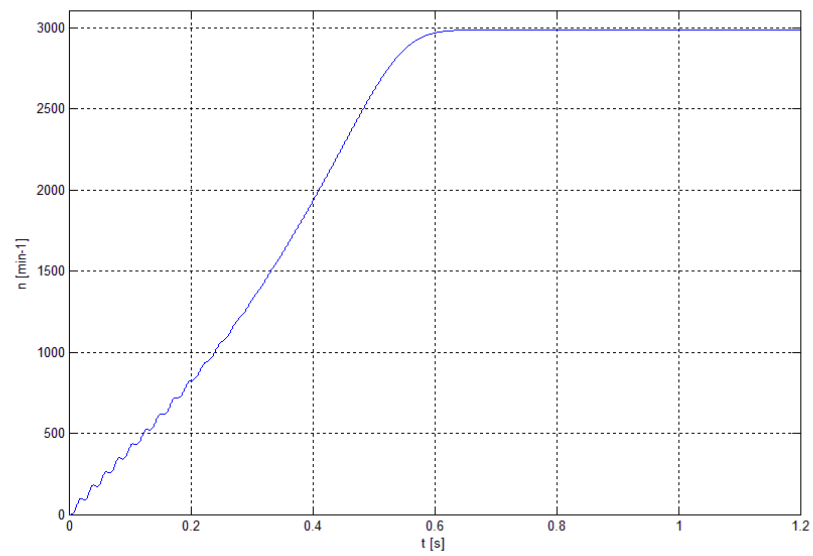
Obr. 3.19 Simulace průběhu proudu první fáze při $U=380$ V, $f=50$ Hz a zapojení vinutí do YY

V simulaci průběhu (obr. 3.20) elektromagnetického statorového momentu je pozorovatelné, že moment zvratu $T_e=26$ Nm, kterého motor dosáhl v čase $t_e=0,45$ s, poté moment klesl a ustálil se na hodnotě 3 Nm.



Obr. 3.20 Simulace průběhu elektromagnetického statorového momentu při $U=380$ V, $f=50$ Hz a zapojení vinutí do YY

Ze simulace otáček na rotoru (obr. 3.21), je pozorovatelný rozběh asynchronního motoru do svých téměř synchronních otáček za čas 0,65 s, poté se otáčky ustálí na konstantní hodnotě.



Obr. 3.21 Simulace průběhu rotorových otáček při $U=380$ V, $f=50$ Hz a zapojení vinutí do YY

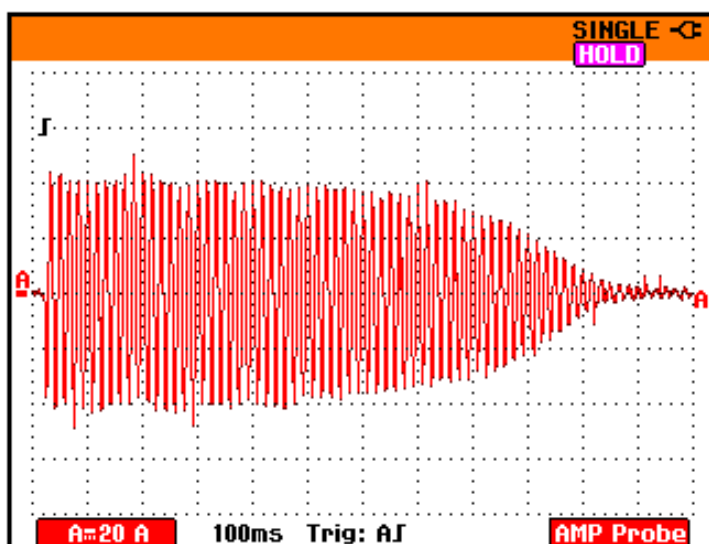
3.2.4 Frekvence 60 Hz napětí 380 V, f-měnič spuštěn, simulace

V tomto případě nelze dodržet poměr s kterým frekvenční měnič pracuje. Měnič je totiž konstruován na napětí 380 V. Poměr napětí k frekvenci se změní místo původních 7,6 na:

$$\frac{U_{60}}{f_{60}} = \frac{380}{60} = 6,33 \quad (3.13)$$

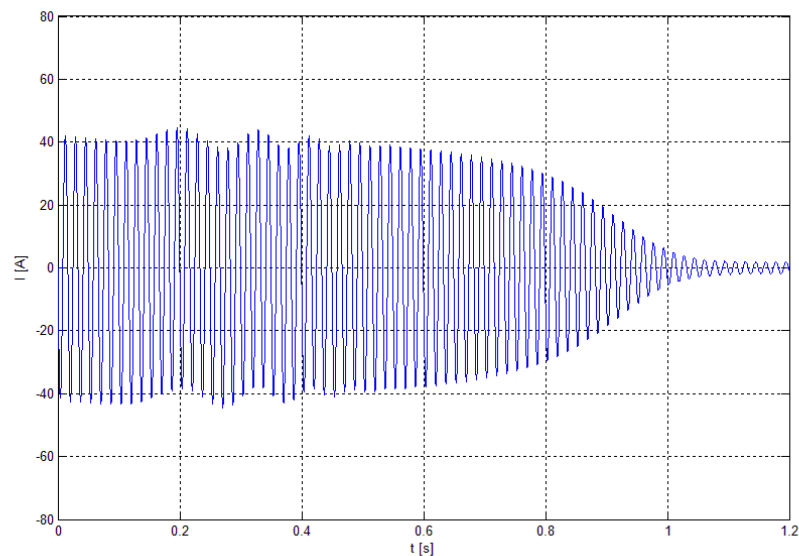
Ze záznamu (obr.3.22) můžeme vidět, že efektivní rázový proud $I_{Is}=35,4$ A a doba rozběhu je $t_r=1,1$ s přičemž ustálený efektivní proud $I_{lu}=2,8$ A. Otáčky statorového magnetického pole jsou

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 60}{1} = 3600 \text{ min}^{-1} \quad (3.14)$$



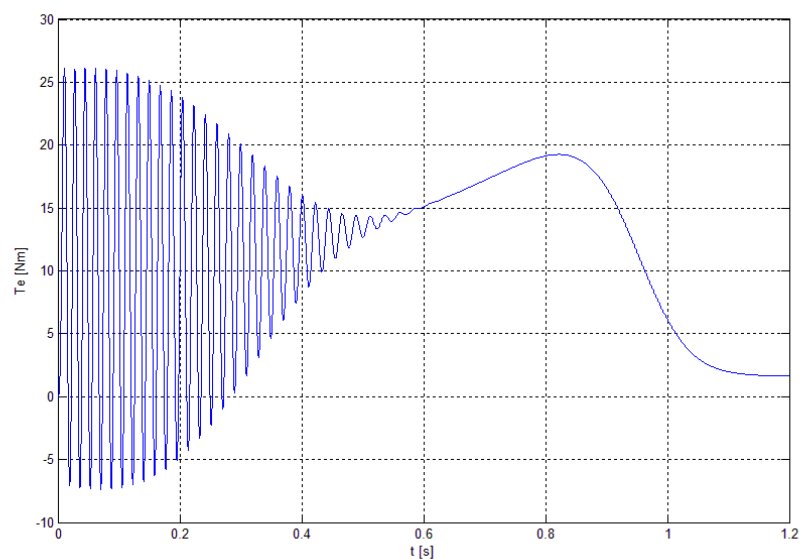
Obr. 3.22 Záznam osciloskopu pro průběh proudu na první fázi pro nastavenou frekvenci 60 Hz a napětí 380 V, při zapojení motoru do dvojité hvězdy

Při konfrontování simulaci proudu v první fázi (Obr. 3.23) pro napětí 380 V a jeho frekvenci 60 Hz se skutečným měřením lze konstatovat, že průběhy jsou téměř totožné.



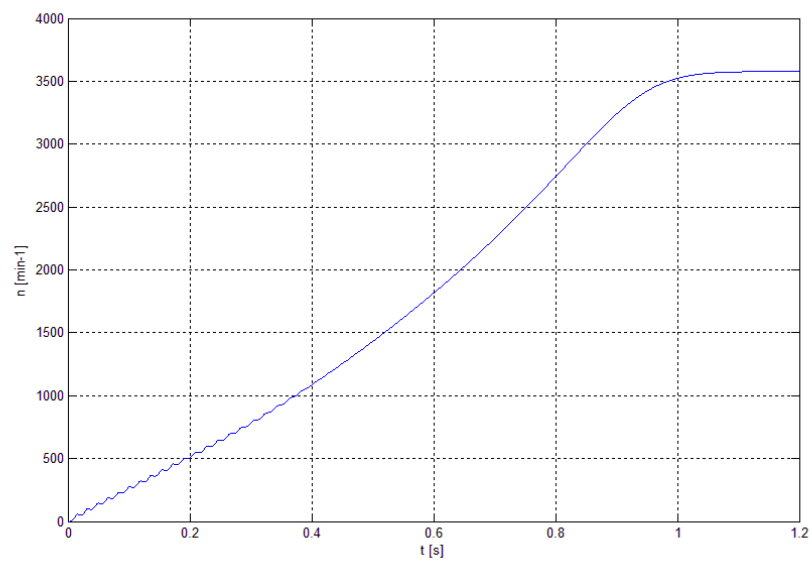
Obr. 3.23 Simulace průběhu proudu první fáze při $U=380$ V, $f=60$ Hz a zapojení vinutí do YY

V simulaci průběhu (obr. 3.24) elektromagnetického statorového momentu je pozorovatelný, že moment zvratu $T_e=19$ Nm, kterého motor dosáhl v čase $t_e=0,85$ s, poté moment klesl a ustálil se na hodnotě 4 Nm.



Obr. 3.24 Simulace průběhu elektromagnetického statorového momentu při $U=380$ V, $f=60$ Hz a zapojení vinutí do YY

Ze simulace otáček na rotoru (obr. 3.25), je pozorovatelný rozběh asynchronního motoru do svých téměř synchronních otáček za čas 1,1 s, poté se otáčky ustálí na konstantní hodnotě.

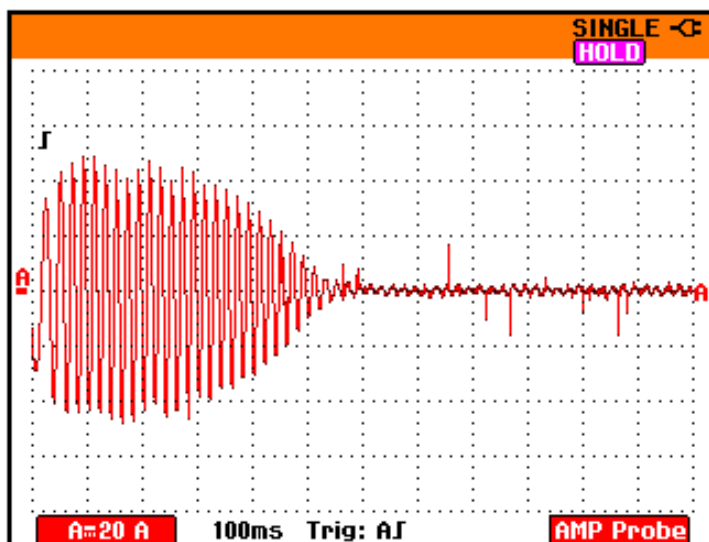


Obr. 3.25 Simulace průběhu rotorových otáček při $U=380$ V, $f=60$ Hz a zapojení vinutí do YY

3.2.5 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,2 s

Pro tuto kapitolu jsem nyní asynchronní motor rozbíhal přes frekvenční měnič a to tak, že jsem využil funkce rozběhové rampy. Frekvenční měnič v tomto případě upravuje rozběh motoru tak aby byl zachován magnetický tok konstantní.

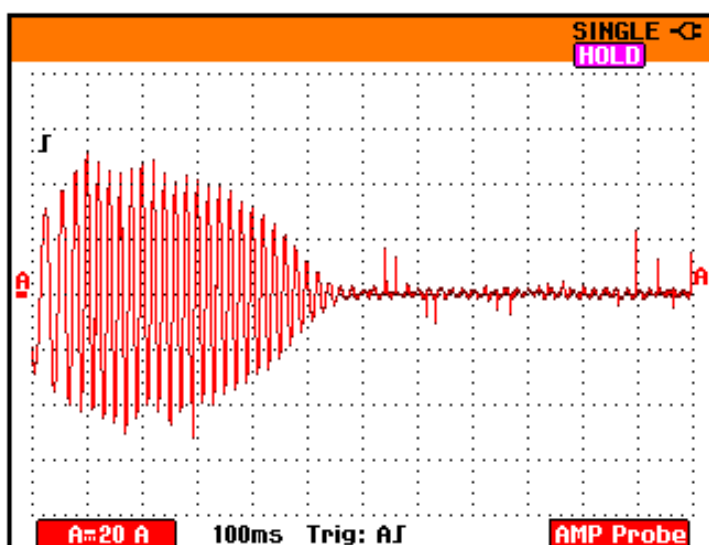
Z pořízeného záznamu (obr. 3.26) můžeme vidět během rozběhu motoru, jak frekvence proudu v první fázi roste a zároveň roste i špičková hodnota proudu. Ze záznamu lze tedy konstatovat, že efektivní hodnota špičkového proudu v první fázi $I_{Is}=35,4$ A, efektivní hodnota ustáleného proudu v první fázi $I_{Iu}=2,8$ A a doba rozběhu pro asynchronní motor je $t_r=0,55$ s.



Obr. 3.26 Záznam spouštění: rozběhová rampa 0,2 s, zapojení vinutí YY

3.2.6 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,3 s

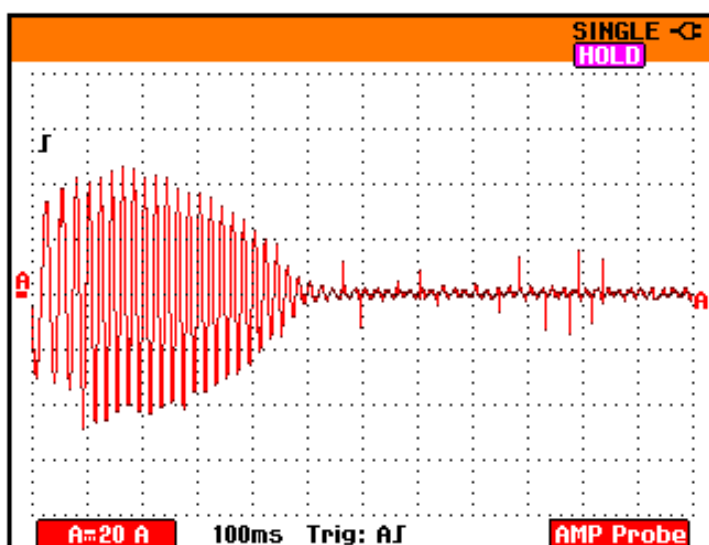
Pro toto měření jsme na frekvenčním měniči upravili délku rozběhové rampy z 0,2 s na 0,3 s a pořídili jsme záznam průběhu proudu v první fázi. Ze záznamu (obr. 3.27) určíme efektivní hodnotu špičkového proudu $I_{Is}=32,5\text{ A}$, efektivní hodnotu ustáleného proudu $I_{Iu}=2,8\text{ A}$ a dobu rozběhu motoru $t_r=0,55\text{ s}$. Na tomto záznamu lze vidět jak postupně frekvence proudu první fází roste, až na hodnotu 50Hz.



Obr. 3.27 Záznam spouštění: rozběhová rampa 0,3 s, zapojení vinutí YY

3.2.7 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,4 s

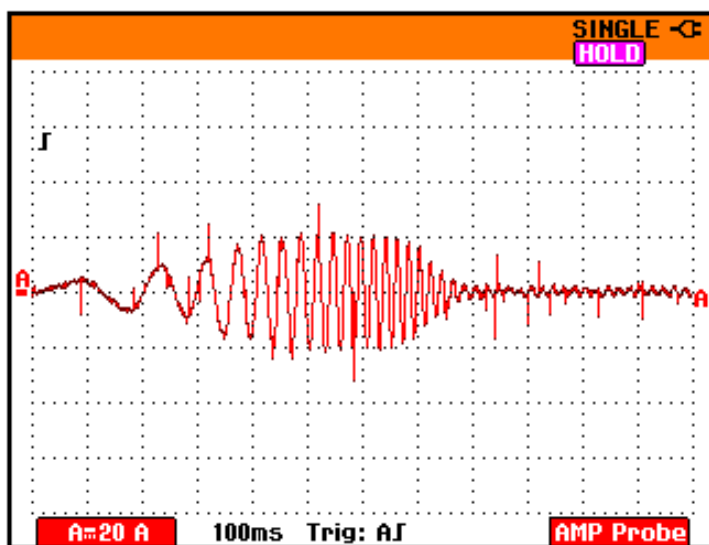
Pro toto měření jsme na frekvenčním měniči upravili délku rozběhové rampy z 0,3 s na 0,4 s a pořídili jsme záznam průběhu proudu v první fázi. Ze záznamu (obr. 3.28) určíme efektivní hodnotu špičkového proudu $I_{Is}=34\text{ A}$, efektivní hodnotu ustáleného proudu $I_{Iu}=2,8\text{ A}$ a dobu rozběhu motoru $t_r=0,52\text{ s}$. Na tomto záznamu lze vidět jak postupně frekvence proudu první fází roste, až na hodnotu 50Hz.



Obr. 3.28 Záznam spouštění: rozběhová rampa 0,4s, zapojení vinutí YY

3.2.8 Spínání motoru přes f-měnič, rampa 0,8 s

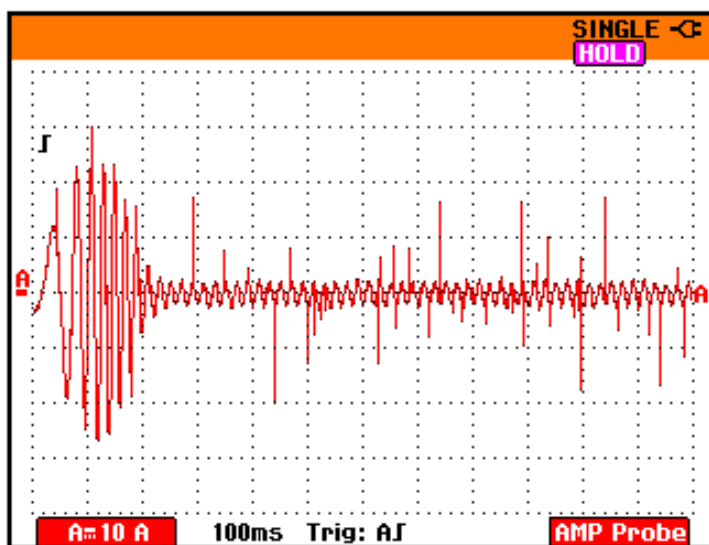
Pro toto měření jsme na frekvenčním měniči upravili délku rozběhové rampy z 0,4 s na 0,8 s a pořídili jsme záznam průběhu proudu v první fázi. Ze záznamu (obr. 3.29) určíme efektivní hodnotu špičkového proudu $I_{Is}=14,1\text{ A}$, efektivní hodnotu ustáleného proudu $I_{Iu}=2,8\text{ A}$ a dobu rozběhu motoru $t_r=0,8\text{ s}$. Na tomto záznamu lze vidět jak postupně frekvence proudu první fáze roste, až na hodnotu 50Hz.



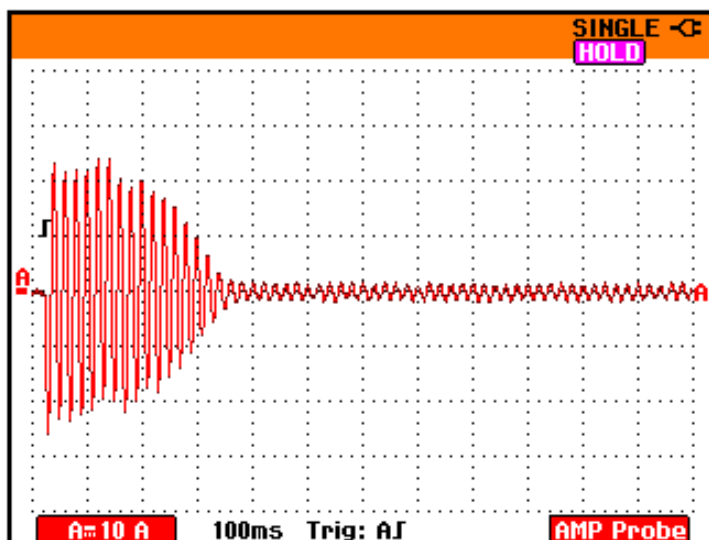
Obr. 3.29 Záznam spouštění: rozběhová rampa 0,8 s, zapojení vinutí YY

3.3 Porovnání rozběhu s frekvenčním měničem a s rozběhem motoru při napájení ze sítě, zapojení vinutí D

Abych mohl poukázat na výhodnost frekvenčního měniče, odměřil jsem připojení asynchronního motoru přímo na síť s podobnými proudovými rázy. Na obr. 3.30, kde je asynchronní motor spouštěn přes měnič frekvence pro nastavenou rampu rozběhu 0,2 s, názorně můžeme pozorovat efektivní hodnotu špičkového proudu v jedné fázi $I_{I\delta}=19,8$ A a časem rozběhu je ona zmiňovaná rampa tedy $t_r=0,2$ s. Pokud bychom téhož chtěli docílit s běžným připojením na síť, museli bychom sdružené napětí snížit na $U_s=285$ V. To má za následek snížení záběrného momentu. Při provozu naprázdno nám však toto snížení momentu nevadí. Z obr. 3.31 je jasné žetelné prodloužení rozběhu motoru. Z původních 0,2 s (pro frekvenční měnič) na $t_r=0,35$ s. Čas rozběhu nezatíženého motoru se prodloužil o 0,15 s. V případě zatížení lze předpokládat znatelné prodloužení času rozběhu, to především díky sníženému momentu, který klesá se čtvercem napětí.



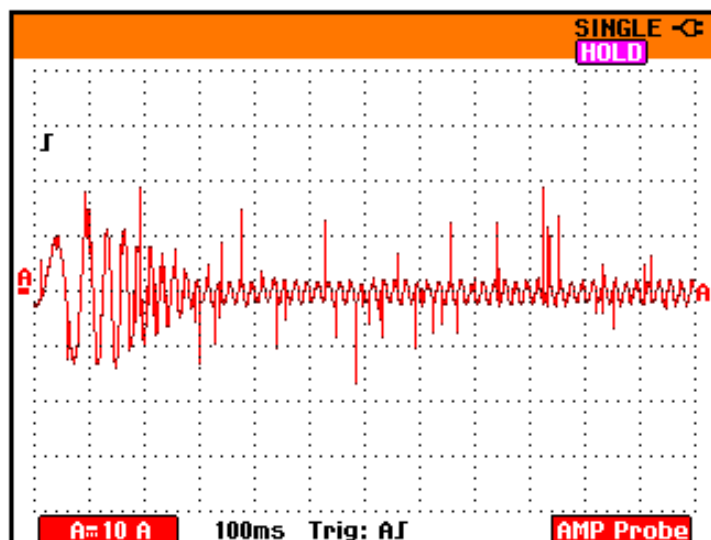
Obr. 3.30 Spouštění motoru přes frekvenční měnič: rampa 0,2 s, zapojení vinutí D



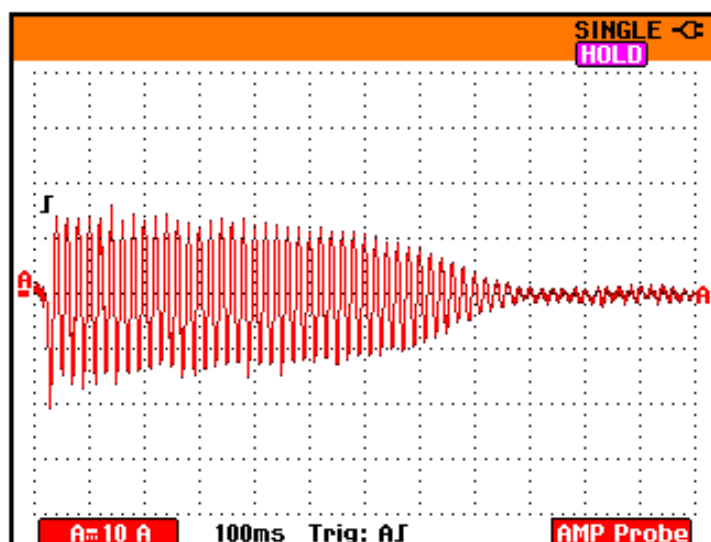
Obr. 3.31 Záznam spouštění motoru napájeného ze sítě napětím 285 V

Pro poukázání na výhodnost frekvenčního měniče jsem provedl ještě další měření. Na záznamu (obr. 3.32) je rozběh motoru za pomoci frekvenčního měniče s nastavenou rampou 0,4 s. Můžeme odečíst efektivní hodnotu rozběhového proudu $I_{I\delta}=10,6$ A a čas rozběhu $t_r=0,35$ s. Pro tento rozběhový proud jsem se opět snažil najít podobné proudové zatížení při připojení asynchronního motoru přímo na síť. Odpovídající hodnota sdruženého napětí je $U_s=190$ V. V záznamu obr. 3.33 můžeme pozorovat prodloužení doby rozběhu. Doba rozběhu motoru je $t_r=0,9$ s, což v rozdílu hodnot činí o 0,55 s delší rozběh a opět vede ke snížení záběrného momentu.

Výhodnost frekvenčního měniče je znatelná už při takto malém výkonu a při tak malém zatížení. Spojením frekvenčního měniče s motorem dostáváme zcela jiný „rozměr stroje“, nejenže můžeme částečně řídit otáčky motoru, ale zároveň šetříme elektrickou síť při rozběhu větších motorů.



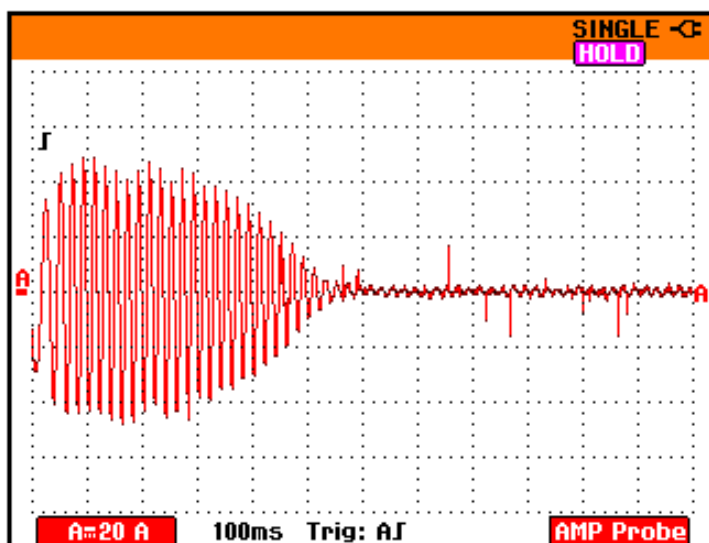
Obr. 3.32 Spouštění motoru přes frekvenční měnič: rampa 0,4 s, zapojení vinutí D



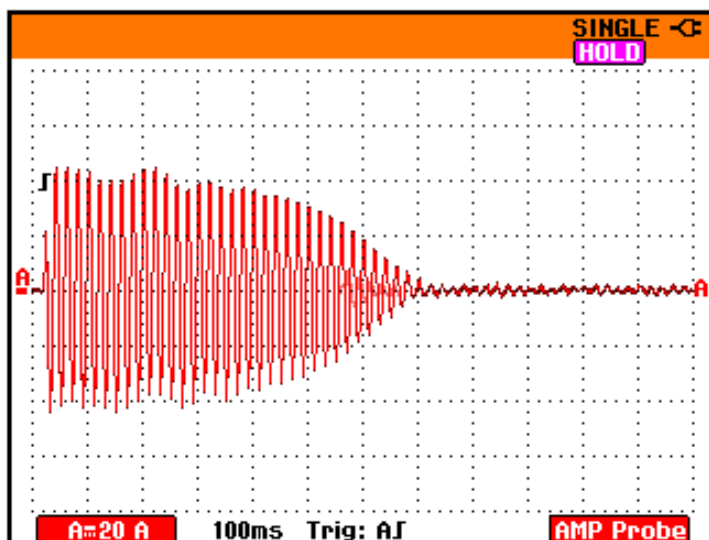
Obr. 3.33 Záznam spouštění motoru napájeného ze sítě napětím 190 V

3.4 Porovnání rozběhu s frekvenčním měničem a s rozběhem motoru při napájení ze sítě, zapojení vinutí YY

Nyní jsem porovnával rozběh motoru přes frekvenční měnič a rozběh přes přímé spojení se sítí, ale v zapojení vinutí do dvojité hvězdy. Opět jsem vycházel z podobností proudových rázů. Na obr. 3.34 je průběh rázového proudu při rozběhu motoru přes frekvenční měnič s nastavenou rampou rozběhu na 0,2 s. Efektivní hodnota špičkového proudu je $I_{Is}=35,4$ A, čas rozběhu je $t_r=0,55$ s. Pokud bychom téhož chtěli docílit s běžným připojením na síť, museli bychom sdružené napětí snížit na $U_s=357$ V. To má za následek snížení záběrného momentu. Při rozběhu naprázdno snížený moment nepředstavuje problém. Z obr. 3.35 je jasně žřetelné prodloužení rozběhu motoru, tedy z původních 0,55 s (pro frekvenční měnič) na $t_r=0,7$ s.



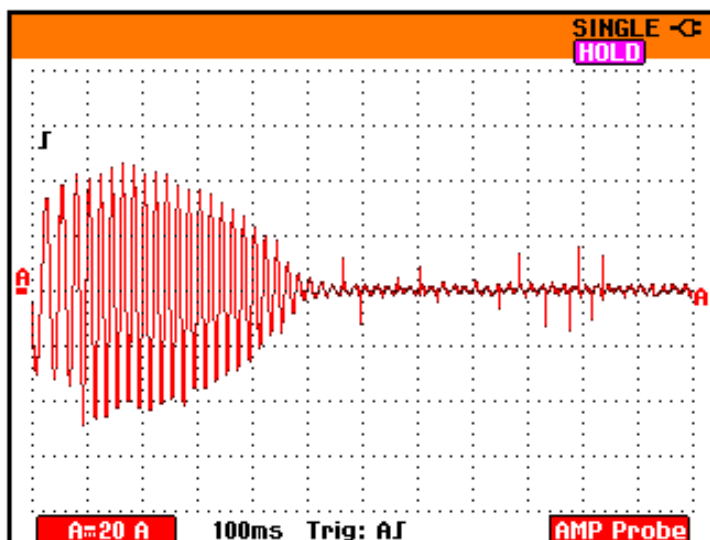
Obr. 3.34 Spouštění motoru přes frekvenční měnič: rampa 0,2 s, zapojení vinutí YY



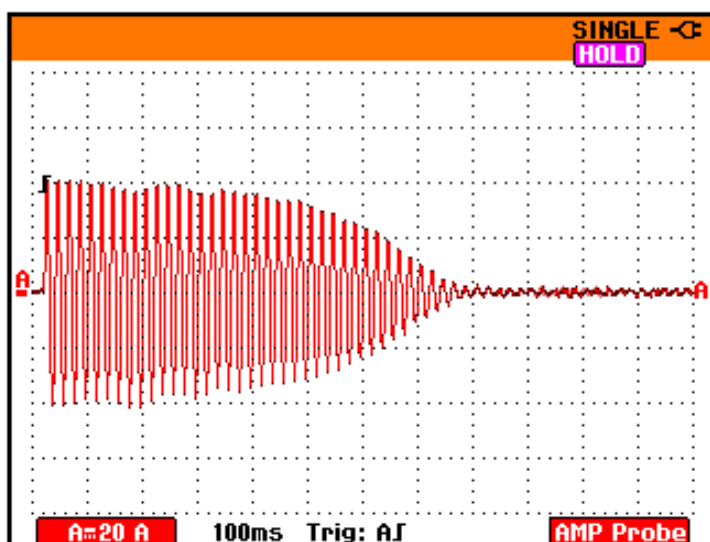
Obr. 3.35 Záznam spouštění motoru napájeného ze sítě napětím 357 V

Jako v předchozí kapitole i nyní porovnáme rozběh motoru přes frekvenční měnič při rampě 0,4 s. K němu se pokusím nalézt podobný rozběh motoru napájeného přímo ze sítě. Doba rozběhu pro nastavenou rampu frekvenčního měniče je $t_r=0,55$ s. Z obr. 3.36 můžeme odečíst efektivní hodnotu špičkového proudu v první fázi $I_{Is}=34$ A. Abych splnil tuto hodnotu špičkového proudu, musel jsem napájecí napětí snížit na $U_s=340$ V. Ze záznamu osciloskopu (obr. 3.37) pro průběhu proudu v první fázi při sníženém napětí sítě je vidět prodloužení doby rozběhu z 0,55 s na dobu rozběhu $t_r=0,8$ s.

Nyní není výhodnost použití frekvenčního měniče znatelná. Je to z důvodů volby krátké rozběhové rampy, kdy se motor rozbíhá na vyšší otáčky (2890 min^{-1}) a frekvenční měnič není schopen za tak krátkou dobu rampy vhodně upravit napětí na svorkách motoru.



Obr. 3.36 Spouštění motoru přes frekvenční měnič: rampa 0,4 s, zapojení vinutí YY



Obr. 3.37 Záznam spouštění motoru napájeného ze sítě napětím 340 V

Vyhodnocení:

Tab. 3.1 Hodnoty pro zapojení vinutí do D

Nastavení	I_{1s} [A]	I_{1u} [A]	t_r [s]	n_s [min ⁻¹]
10 Hz, 76 V	4,2	2,1	0,2	300
25 Hz, 190 V	14,1	1,4	0,25	750
50 Hz, 380 V	22,6	1,4	0,2	1500
60 Hz, 380 V	22,6	1,4	0,38	1800
rampa 0,2 s	19,8	1,4	0,22	-
rampa 0,3 s	17,7	1,4	0,25	-
rampa 0,4 s	10,6	1,4	0,3	-
rampa 0,8 s	5,7	1,4	0,55	-

Z naměřených hodnot lze konstatovat, že za pomoci rozběhové rampy, kdy frekvenční měnič mění nejen velikost amplitudy napětí ale také frekvenci během této rampy, nám klesá rázový proud.

Tab. 3.2 Hodnoty pro zapojení vinutí do YY

Nastavení	I_{1s} [A]	I_{1u} [A]	t_r [s]	n_s [min ⁻¹]	T_e [Nm]	t_e [s]
10 Hz, 76 V	8,5	-	0,4	600	-	-
25 Hz, 190 V	21,2	2,8	0,4	1500	16	0,3
50 Hz, 380 V	35,4	2,8	0,6	3000	26	0,45
60 Hz, 380 V	35,9	2,8	1,1	3600	19	0,85
rampa 0,2 s	35,4	2,8	0,55	-	-	-
rampa 0,3 s	35,4	2,8	0,55	-	-	-
rampa 0,4 s	34	2,8	0,52	-	-	-
rampa 0,8 s	14,1	2,8	0,8	-	-	-

Z hlediska provozu lze frekvenci 10 Hz považovat za kritickou. Motor nebyl schopen si udržet otáčky a elektromagnetický moment kolísal. Dále můžeme říci, že při frekvenci 60 Hz nám díky nedodržení konstantního magnetického toku rapidně klesla momentová charakteristika oproti frekvenci 50 Hz. V praxi by tento stav byl nepřipustný. Pro rozběh za pomoci rampy je třeba vhodně zvolit její čas. V případě rozběhové rampy 0,2 až 0,4 s lze říci, že tento čas rozběhové rampy byl nedostatečný. Minimální doporučený čas pro rozběh tohoto motoru za pomoci rampy, vycházíme-li z naměřených hodnot, je 0,8 s.

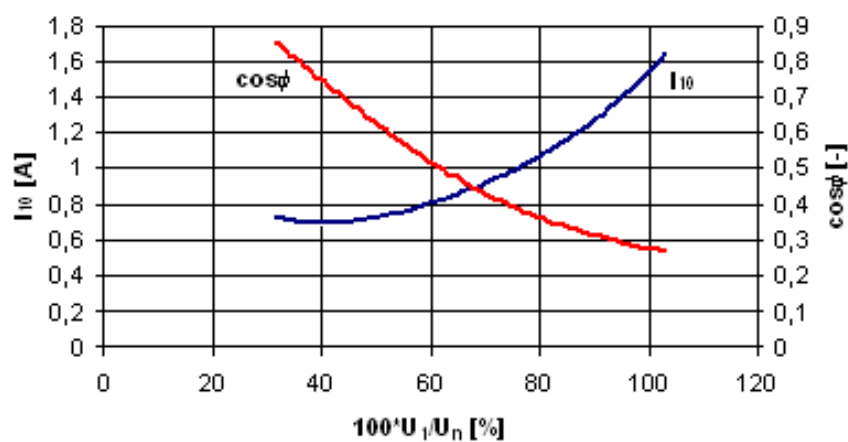
4 Porovnání teoretických a naměřených hodnot

Podrobný rozbor jsem provedl v rámci jednotlivých kapitol. Naměřené hodnoty se shodovaly s teoretickým předpokladem.

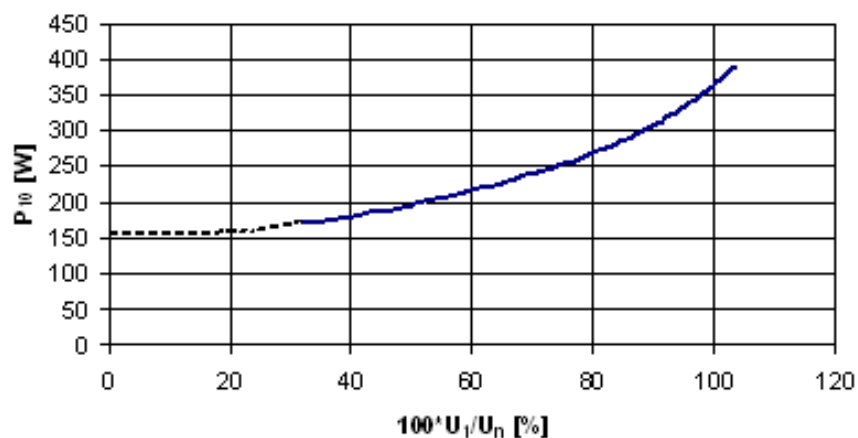
4.1 Popis simulace

Abychom mohli využít simulačního modelu kolegy Rusnoka, bylo třeba provést některá nezbytná měření za účelem získání parametrů pro tento model. Simulace slouží především pro porovnání teoretických a naměřených hodnot, které jsem během tvorby získal. Simulování probíhalo jenom pro vyšší otáčky. Důvodem bylo, že při spouštění motoru do vyšších otáček dochází v porovnání s nižšími otáčkami k delším a výraznějším přechodovým dějům.

4.2 Asynchronní motor, měření naprázdno, vinutí do YY

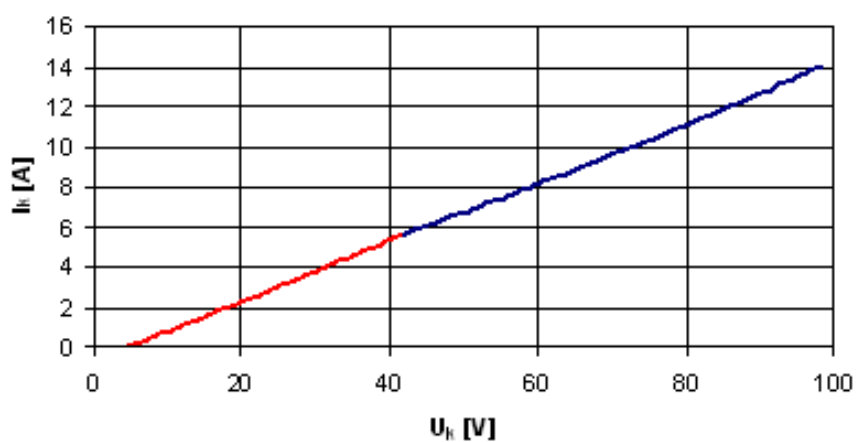


Obr. 4.1 Graf měření naprázdno pro zapojení AM do dvojité hvězdy: proud naprázdno, účinník naprázdno

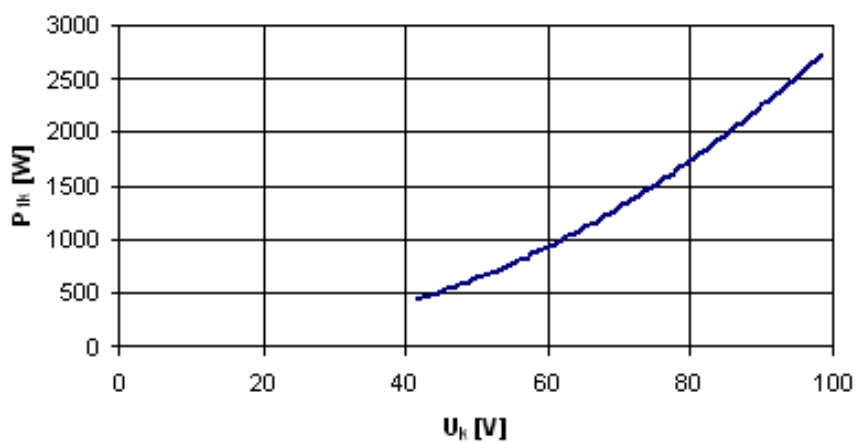


Obr. 4.2 Graf měření naprázdno pro zapojení AM do dvojité hvězdy: příkon naprázdno

4.3 Asynchronní motor, měření nakrátko, vinutí do YY



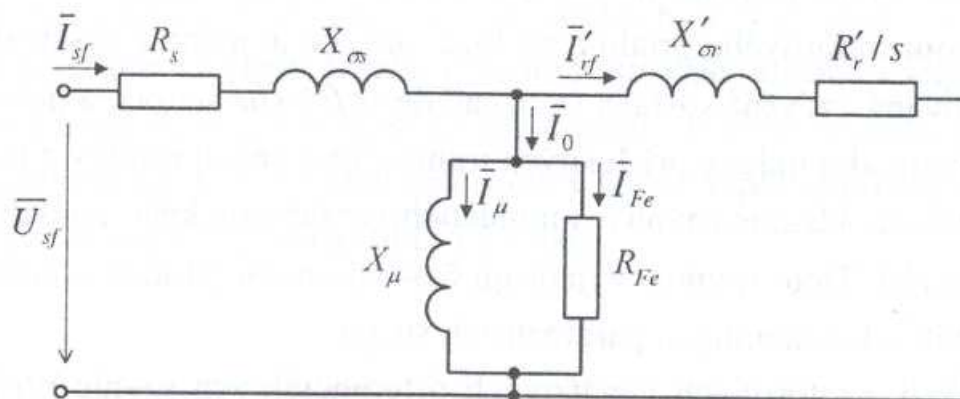
Obr. 4.3 Graf měření nakrátko pro zapojení AM do dvojité hvězdy: proud nakrátko



Obr. 4.4 Graf měření nakrátko pro zapojení AM do dvojité hvězdy: proud nakrátko

4.4 Parametry pro simulaci asynchronního motoru, vinutí YY

Parametry je nutné určit z náhradního schématu viz. obr. 4.5.



Obr. 4.5 Náhradní schéma asynchronního motoru [5]

Tab 4.2 Hodnoty pro simulaci odečtené z jednotlivých grafů a měření pro zapojení AM do dvojité hvězdy

ΔP_{01N} [W]	U_{k1} [V]	M_{k1} [Nm]	$\cos\phi_k$ [-]	$\cos\phi_{0N}$ [-]	R_s [Ω]
155	170,6	2,94	0,64	0,273	2,9

Z grafu (obr. 4.2) jsem odečetl příkon naprázdno

$$\Delta P_{01N} = 155 \text{ W}$$

určil jsem ztrátový moment

$$M_{ztr} = \frac{\Delta P_{01N}}{\omega_s} = \frac{155}{\frac{2\pi \cdot 3000}{60}} = 0,49 \text{ Nm}$$

spočetli jsme zdánlivý výkon

$$S_M = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 500 \cdot 6 = 5196,15 \text{ VA}$$

magnetizační proud

$$I_\mu = I_{0N} \cdot \sin \phi_{0N} = 1,54 \cdot 0,962 = 1,48 \text{ A}$$

určil jsem magnetizační reaktanci

$$X_\mu = \frac{U_{sfN}}{I_\mu} = \frac{288,68}{1,48} = 195,01 \text{ } \Omega$$

z magnetizační reaktance jsem určil vzájemnou indukčnost stroje

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2\pi f_s} = \frac{195,01}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,62 \text{ H}$$

ztrátový proud v železe

$$I_{Fe} = I_{0N} \cos \varphi_{0N} = 1,54 \cdot 0,273 = 0,42 \text{ A}$$

ztráty v železe

$$R_{Fe} = \frac{U_{sfn}}{I_{Fe}} = \frac{288,68}{0,26} = 687,33 \text{ } \Omega$$

přepočítaný proud nakrátko při jmenovitém napětí

$$I_{KN} = I_K \cdot \frac{U_N - U_K^x}{U_K - U_K^x} = 6 \cdot \frac{500 - 8,23}{76,21 - 8,23} = 43,4 \text{ A}$$

činný odpor stroje

$$R_K = \frac{U_{sfn} \cdot \cos \varphi_K}{I_{KN}} = \frac{288,68 \cdot 0,64}{43,4} = 4,26 \text{ } \Omega$$

určení odporu rotoru přepočteného na stator

$$R'_R = R_K - R_S = 4,26 - 2,9 = 1,36 \text{ } \Omega$$

rozptylová reaktance

$$X_{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{U_{sfn}}{I_{KN}}\right)^2 - R_K^2} = \sqrt{\left(\frac{288,68}{43,4}\right)^2 - 4,26^2} = 5,11 \text{ } \Omega$$

rozdělené celkové rozptylové reaktance pro rotor a stator

$$X_{\sigma s} = X'_{\sigma R} = \frac{X_{\sigma}}{2} = \frac{5,11}{2} = 2,555 \text{ } \Omega$$

celková indukčnost motoru

$$L_{\sigma} = \frac{X_{\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_s} = \frac{5,11}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,0163 \text{ H}$$

rozdělení celkové indukčnosti pro rotor a stator

$$L_{\sigma s} = L'_{\sigma R} = \frac{L_{\sigma}}{2} = \frac{0,0163}{2} = 0,00815 \text{ H}$$

Tímto jsem získal všechny potřebné parametry pro simulaci. Simulace probíhala v programu Matlab.

5 Závěr

V této práci jsem se zabýval posuzováním nestandardních režimů na provozní vlastnosti asynchronních strojů. Posuzoval jsem především způsoby spouštění při sníženém napětí, a to jak klasicky (transformátorem), tak pomocí softstartéru a frekvenčního měniče. Dále jsem pro vybrané spouštění udělal simulaci, kterou jsem porovnal s mnou získanými hodnotami.

Spouštění asynchronního motoru při sníženém napětí bych doporučoval pro motory velkých výkonů, kde je žádoucí omezení záběrného proudu.

Použití softstartéru lze doporučit v případech rozběhu ventilátorů, čerpadel apod. Nedoporučuje se ho používat v případech kdy požadujeme od soustrojí velký záběrný moment, který se blíží momentu stroje nakrátko. V mé diplomové práci bohužel nebylo možno motor vhodně zatížit, takže plný potenciál softstartéru nebyl využit. Z naměřených hodnot lze říci, že volba vhodné rozběhové rampy má zásadní vliv na rozběh motoru. Softstartér je dostupný díky své ceně. V případě nezávislého spouštění více strojů nám stačí pouze jeden softstarter, který se po ukončení rozběhu jenom přemostí a rozbíhá další zařízení. Je nutno podotknout, že ne všechny softstartéry jsou dimenzovány na trvalý provoz. Kdybychom ovšem měli softstartér dimenzován na trvalý provoz, lze s výhodou využít funkce úsporného provozu, kdy se motor odbudí a napájí se sníženou velikostí napětí.

Frekvenční měnič má díky svým univerzálním vlastnostem široké uplatnění, jedinou jeho nevýhodou je vysoká pořizovací cena. Na rozdíl od softstartéru je třeba aby každé zařízení mělo svůj frekvenční měnič. V případě přemostění frekvenčního měniče a připojení rozběhnutého zařízení přímo na síť by došlo k záchvěvu, protože výstupní frekvence f -měniče není synchronizována s frekvencí sítě.

Porovnáním všech posuzovaných způsobů rozběhových metod lze dojít k závěru, že nejlepší variantou spouštění asynchronního motoru je prostřednictvím frekvenčního měniče, a to přes rozběhovou rampu. Zde je však nutné, abychom správně vyhodnotili vhodnou délku rozběhové rampy. Je třeba taktéž podotknout, že v mém případě by z ekonomického hlediska volba frekvenčního měniče nebyla vhodná. V mém případě by bylo dostačující spouštění motoru za pomoci přímého připojení k síti.

Použitá literatura

- [1] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2002. 136 s. ISBN 80-248-0025-X.
- [2] PETROV, Georgij. *Elektrické stroje 2 : Asynchronní stroje – Synchronní stroje*. Přeložil a doplnil Břetislav Benda. 1. vyd. Praha : Academia 1982. 728 s.
- [3] ŽÁČEK, Jaroslav a Karel KÜNZEL. Měníče frekvence a softstartéry – přehled trhu. *Automatizace*. Praha: Automatizace, 2006, roč. 49, č. 3, s. 207-210. ISSN 0005-125x. Dostupné z: <http://www.automatizace.cz/article.php?a=1142>
- [4] BULGAKOV, Alexej Alexejevič. *Řízení asynchronních motorů měniči frekvence*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 240 s. ISBN 80-030-0179-X.
- [5] HRABOVCOVÁ, Valéria. RAFAJDUS, Pavol. FRANKO, Marek. HUDÁK, Peter. *Meranie a modelovanie elektrických strojov*. 2.vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2009, 335 s. ISBN 978-80-8070-924-2
- [6] BAŠTA, Jan. *Měření na elektrických strojích: 4. Měření na indukčních strojích*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1962, 309 s.
- [7] MOHAN, Ned. *Electric drives: an integrative approach*. Minneapolis: MNPERE, c2000. ISBN 09-663-5301-3.